

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství



Variantní návrh dvoukolejného odstavného tunelu
Alternative Design for a Refuge Double Track Tunnel

Student:

Bc. Lenka Jasenovcová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lenka Jasenovcová

Studijní program:

N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor:

3607T035 Geotechnika

Téma:

Variantní návrh dvoukolejného odstavného tunelu
Alternative Design for a Refuge Double Track Tunnel

Zásady pro vypracování:

- 1, Úvod, rešerše
- 2, Představení projektu, IG podmínky
- 3, Návrh postupu ražby
- 4, Numerický model - srovnání variant
- 5, Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Klepsatel, F. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 80-889-0543-5.

Kolymbas, D., *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling*. Berlin: Springer, c2005, xv, 437 s. ISBN 35-402-5196-0.

Exner, K. *Ražení důlních děl*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1991, 240 s. ISBN 80-707-8077-0.

Klepsatel, F. a kol. *Městské podzemní stavby*. Bratislava: Jaga Group, 2005, 286 s. ISBN: 80-8076-021-7.

R. R. Tatiya. *Surface and Underground Excavations – Methods, Techniques and Equipment*. A.A.

BALKEMA PUBLISHERS LEIDEN. ISBN 90 5809 627 0

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.**

Datum zadání: 27.02.2015

Datum odevzdání: 30.11.2015



doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na mojí diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

Poděkování:

Za pomoc při tvorbě diplomové práce patří mé poděkování především panu Ing. Lukáši Ďurišovi, Ph.D., za konzultace a rady při tvorbě a návrhu matematického modelu. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Petru Makáskovi, Ph.D. za poskytnuté podklady potřebné k tvorbě diplomové práce. Ráda bych také poděkovala Ing. Miroslavovi Pinkovy za věcné rady při tvorbě modelu.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na problematiku ražby liniových děl ve složitých inženýrsko – geologických podmínkách. Jedná se o variantní návrh ražby odstavného tunelu metra v Baku, hlavním městě Ázerbájdžánu. Tunel je situován za stávající hloubenou stanicí B12, navíc pod nízkým nadložím a s hustou povrchovou zástavbou. Práce pojednává také o rizicích, která mohou nastat při ražbě v daných podmínkách a jejich možné eliminace. Praktická část diplomové práce se zabývá variantním návrhem ražby odstavného tunelu, především s ohledem na sedání povrchu území. Jedná se o varianty ražby: s využitím pilotní štoly, vertikálním členěním výrubu s ponechaným jádrem horniny, vertikálním členěním výrubu, kombinovaným a horizontálním členěním výrubu. Pro dané varianty byl vypracován postup ražby, který zahrnuje členění výrubu díla a rozfázování postupu jednotlivých zabírek. Pro ověření vhodnosti ražeb v těchto podmínkách byl pro každý návrh zpracován numerický model 2D. Výsledky jednotlivých modelů byly srovnány. Vybrána byla nejvhodnější varianta, která se zpracovala pomocí numerického modelu 3D a vyhodnotila se.

Klíčová slova: ražba tunelu, numerický model, kombinované členění výrubu

Abstrakt

This diploma thesis is focused on line stambling work in complex engineering – geological conditions. It is issued as alternative proposal of the subway storage excavation in Baku, the capital of Azerbaijan. The tunnel is situated right behind already existing, dredged, station B12 besides beneath a shallow and dense surface buldings. This thesis also discusses the risks during digging in such a these conditions and the possible risk elimination. The practical part of thesis deals with the design variant of the storage tunnel excavation, especialy with the surface settlement. The issue is about the excavation variant: with pilot adit, vertical sequence of excavation with rock core left. Vertical sequence of excavation combined with horizontal sequence of exavation. For given varints has been developed exavation process which includes the division of exavation work and the individual process phasing. For verification of the mintage suitability in these conditions was proceded a numerical 2D model for each design. Results of each model were compared and most suitable variant were processed and evaluated in 3D model.

Key words: excavation tunnel, numerical model, combined sequence of exavation

Obsah

1	Úvod	11
2	Projekt rozšíření linek metra Baku	13
2.1	Město Baku	13
2.2	Stávající systém metra	15
2.3	Plán rozšíření linek metra v Baku	16
3	Odstavný tunel za stanicí B12	17
3.1	Směrové řešení odstavného tunelu	17
3.2	Profil odstavného tunelu	18
3.3	Inženýrsko – geologické podmínky	19
3.4	Rizika spojená s ražbou odstavného tunelu	20
3.4.1	Rizika ražby s nízkým nadložím	20
3.4.2	Rizika ražby z hlediska geologie	21
3.4.3	Rizika ražby s hustou povrchovou zástavbou	21
3.5	Eliminace rizik ražby odstavného tunelu	22
3.5.1	Členění výrubu	23
3.5.2	Předstihová opatření prováděná před čelbou	24
4	Variantní návrh postupu ražby odstavného tunelu	27
4.1	Ražba horizontálním členěním výrubu s pilotní štolou	27
4.2	Ražba vertikálním členěním výrubu s ponechaným jádrem horniny	29
4.3	Ražba vertikálním členěním	31
4.4	Ražba kombinovaným členěním výrubu	33
4.5	Ražba horizontálním členěním výrubu	34
5	Matematický model odstavného tunelu v 2D	36
5.1	Úvod k matematickému modelování metodou MKP, program Plaxis	36
5.2	Tvorba modelu	37
5.3	Model jednotlivých variant ražby odstavného tunelu	41

5.3.1	Ražba pilotní štolou	41
5.3.2	Ražba vertikálním členěním s ponechaným jádrem horniny.....	47
5.3.3	Ražba vertikálním členěním	54
5.3.4	Ražba kombinovaným členěním	60
5.3.5	Ražba horizontálním členěním výrubu	66
5.4	Srovnání jednotlivých variant ražeb	72
6	Matematický model odstavného tunelu v 3D	74
6.1	Tvorba modelu	74
6.1.1	Geometrie modelu	74
6.1.2	Zadání materiálových charakteristik	75
6.1.3	Síť numerického modelu	75
6.1.4	Okrajové podmínky	77
6.2	Fáze výpočtu	77
6.3	Výsledky výpočtu modelu	78
7	Závěr	84

Seznam použitého značení

c_{ef}	efektivní soudržnost [-]
c'_{inc}	zvýšená soudržnost [kN/m ² /m]
d	tloušťka ostění [m]
D	průměr díla [m]
EA	tlaková tuhost [kN/m]
EI	ohybová tuhost [kNm ² /m]
E_{def}	modul pružnosti [MPa]
E_{50}^{Ref}	referenční sečnový modul [MPa]
E_{oed}^{Ref}	referenční oedometrické modul [MPa]
E_{ur}^{Ref}	referenční modul pružnosti při zatížení a opětovném přetížení [MPa]
γ	objemová tíha [kN/m ³]
γ_{sat}	objemová tíha saturované zeminy [kN/m ³]
φ_{ef}	efektivní úhel vnitřního tření [°]
ψ	úhel dilatance [°]
km ²	kilometr čtverečný
km	kilometr
K_0	koeficient zemního tlaku v klidu [-]
$K_{0,nc}$	koeficient zemního tlaku v klidu pro podmínky normální konsolidace [-]
k_x, k_y, k_z	propustnost saturované zeminy ve třech směrech [-]
m	metr

mm	milimetr
NATM	Nová rakouská tunelovací metoda
P_{Ref}	referenční napětí [kN/m ²]
R_{inter}	redukční faktor [-]
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
ν	Poissonovo číslo [-]
w	tíha [kN/m/m]
u	totální deformace [m]
u_y	vertikální deformace [m]
τ_{rel}	čerpání pevnosti [-]
3D	trojrozměrný
2D	dvourozměrný

1 Úvod

Téma diplomové práce je „*Variantní návrh dvoukolejného odstavného tunelu*“. Práce by se měla zabývat variantními návrhy ražby pro odstavný tunel metra v Baku, zejména s ohledem na sedání.

Baku, jako hlavní a největší město Ázerbájdžánu, překypující nerostným bohatstvím a velkou zalidněností, se dále rozvíjí a je na ekonomickém vzestupu. To je hlavní důvod nutnosti celkového rozšíření infrastruktury ve městě. A to hlavně velkokapacitní dopravy metra, která nebude ovlivňovat hustě obydlené a památkové části města.

Baki Metropoliteni je fungující síť metra v Baku, která k dnešnímu dni měří 34 km a propojuje 23 stanic. Metro má dvě linky: Linka 1 (červená linka) a Linka 2 (zelená linka). Tyto dvě linky jsou nedostačující pro kapacity tohoto rozrůstajícího se města, proto byl vypracován návrh pro rozšíření metra o linku fialovou, žlutou a modrou.

Předpokládaná trasa fialové linky končí stanicí B12, za níž je umístěn v oblouku odstavný tunel. Odstavný tunel je navržen na odstavení dvou za sebou stojících souprav metra včetně ponechaného prostoru pro umístění bezpečnostních zářezů. Na konci odstavného tunelu je navržena větrací šachta, která není předmětem této diplomové práce.

Odstavný tunel se nachází v relativně malé hloubce za stanicí B12, která je hloubená. Rizika pro ražbu tohoto díla v celé jeho délce jsou zejména nízké nadloží a velmi hustá zástavba na povrchu. Z geologického hlediska se zde vyskytují zejména jíly v neogenních formacích a to jíly s nízkou a střední plasticitou.

Pro eliminaci sedání je v první řadě velmi důležité navrhnout vhodný postup ražby. Snížení sedání vlivem ražby můžeme docílit rozdělením výrubu na dílčí části, které budou jednotlivě odtěžovány a vyztužovány. Jedná se především o vertikální členění výrubu, které může být v jednotlivých částech pobírání čelby, doplněno lokálním vyztužením pomocí kotev, jehlování nebo mikropilotových deštníků. Vhodným řešením se jeví použití pilotní štol, která se předráží v předstihu a vyztužuje.

Nevhodný návrh ražby tunelu, a tím i nedostatečná eliminace sedání, může způsobit vážné poruchy na povrchu a povrchových objektech. V nejhorších případech může dojít

až k prokomínování povrchu nebo haváriím objektů. Je proto vhodné důsledně provést návrh a zabezpečit jednotlivá kontrolní i varovná opatření.

Cílem této práce je navrhnout způsoby ražby odstavného tunelu v daných podmínkách, zejména s ohledem na sedání. Poukázat na problematiku spojenou s ražbou s nízkým nadloží a hustou zástavbou na povrchu. Předpoklady jednotlivých variant ražeb potvrdit pomocí numerických modelů. Dále provést srovnání všech navržených variant ražeb a vyhodnotit nejvhodnější variantu ražby pro odstavný tunel v Baku.

Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou, tedy do pěti velkých kapitol. První dvě části práce se zaměřují na teoretickou část projektu. Zbýlé tři kapitoly řeší praktickou část projektu, především navržené postupy ražeb a jejich numerické modely.

První část diplomové práce popisuje celkový projekt rozšíření linek metra v Baku. Informuje o místě realizace projektu, ekonomice, hustotě zalidnění a hospodářství země. Dále popisuje současný stav metra v Baku a jeho plánované rozšíření.

Druhá část se zabývá již konkrétním odstavným tunelem za stanicí B12 na trase fialové linky metra. Popisuje umístění odstavného tunelu a jeho geometrii. Dále se zaměřuje na inženýrsko - geologické poměry v místě realizace tunelu. Poukazuje také na rizika spojená s ražbou odstavného tunelu a jejich možná řešení.

Třetí část se zaměřuje na navržení jednotlivých variant ražeb odstavného tunelu, s velkým důrazem na eliminaci sedání. Tyto varianty jsou navrženy zejména s ohledem na geologii, nízké nadloží a hustou povrchovou zástavbu v místě realizace. V návrhu je rozebrána ražba pomocí pilotní štoly, dále ražba vertikálním členěním a vertikálním s ponechaným jádrem. Pro srovnání je zahrnuta také ražba klasickým horizontálním členěním.

Čtvrtá část se věnuje numerickým modelům jednotlivých návrhů ražeb. Součástí je jejich vyhodnocení a stanovení nejvhodnější varianty ražby pro dané podmínky. Pro jednotlivé varianty ražby je vytvořen numerický model pomocí softwaru Plaxis 2D.

Pátá část se zaměřena na nejvhodnější ražbu, pro kterou je vytvořen prostorový model 3D v programu Midas GTS. Výsledky z modelů jsou zpracovány graficky ve formě obrázků a srovnávacích grafů. Součástí je i vyhodnocení a srovnání výsledků sedání 2D s 3D modelem.

2 Projekt rozšíření linek metra Baku

2.1 Město Baku

Baku je hlavním a největším městem Ázerbájdžánu a také zároveň jeho největším přístavem. Leží na pobřeží Kaspického moře, pod úrovní světového oceánu, na Apšeronském poloostrově (obr. 1). Baku má oficiálně 2,5 milionu obyvatel a rozkládá se na 260 km². Avšak počet obyvatel je ve skutečnosti mnohem vyšší a dále roste. Jeho poloha se nachází nedaleko významných ropných polí a soustřeďují se zde ropné rafinerie a většina průmyslu země. [1]



Obr. 1 Mapa Ázerbájdžánu a sousedních zemí

Název tohoto města pochází ze starých perských jmen Bad – kube, což znamená „město, kde vítr fouká“, nebo Baghkuh, což znamená „Boží hora“. Město se dělí na dvě základní části, staré město (ázerbájdžánsky İçəri Şəhər) a nové části města. Baku je rozděleno do jedenácti administrativních částí – rajónů: Binagadi, Garadagh, Yasamal,

Nizami, Narimanov, Nasimi, Sabunchu, Suraxani, Sabail, Khatai, Azizbayov a 48 městských částí. [2]

Z hlediska národního hospodářství se nejdůležitějším odvětvím stal ropný průmysl a zemní plyn. Zemí vede důležitý ropovod z Baku přes hlavní město Gruzie až do tureckého přístavu Ceyhan (Baku – Tbilisi- Ceyhan). Tento ropovod se stal druhým nejdelším na světě po ropovodu Družba. Ropné rafinerie a průmysl se soustřeďují především kolem hlavního města. Předměstí Baku je poseto těžebními věžemi a ropnými jezírky.



Obr. 2 Těžba na předměstí Baku [8]

Bohatství pocházející z těžby se odráží na celkovém dojmu města. V současnosti Baku působí hezkým a upraveným dojmem města, v němž se snoubí moderní architektura se starými památkami.

Baku je také hlavním centrem vzdělávání v Ázerbájdžánu, sídlem mnoha státních i soukromých univerzit. Především můžeme zmínit Ázerbájdžánskou lékařskou univerzitu, Ázerbájdžánskou státní ekonomickou univerzitu, Ázerbájdžánskou státní naftovou akademii, Ázerbájdžánskou technickou univerzitu, Ázerbájdžánskou univerzitu jazyků a mnoho dalších univerzit. [2]

2.2 Stávající systém metra

Město Baku má v současnosti v provozu síť metra, nazývanou Baki Metropoliteni. Tato síť byla otevřena v roce 1967. Centrální stanice metra se nachází velmi hluboko a zdobí je nádherné propracované dekorace, ve kterých se snoubí ázerbajdžánské národní motivy se sovětskou ideologií. Po stagnaci veřejné dopravy, během pádu SSSR (do jehož uskupení Ázerbájdžán patřil), se začíná opět s jejím rozšiřováním.

Metro má v provozu pouze dvě linky o celkové délce 34 km s 23 stanicemi (obr. 3). Metro má dvě linky: Linka 1 (červená linka) a Linka 2 (zelená linka). Červená linka měří 18,4 km a propojuje 13 stanic. Vede ze stanice İçərişəhər (Old town) do stanice Həzi Aslanov (Ezi Aslanov). Zelená linka měří 16,3 km a propojuje 10 stanic. Vede ze stanice Xətai (Khatai) do stanice Dərnəgül (Dernegul). [3]



Obr. 3 Současný systém metra [9]

2.3 Plán rozšíření linek metra v Baku

Každý rok převez metro v průměru 200 milionů cestujících. Na jeden pracovní den tedy připadá 712 500 cestujících. To už se blíží k produktivitě Pařížského metra, které přepraví 213 milionů cestujících za rok a 725 000 cestujících za jeden pracovní den.

Metro v Baku brzy dosáhne limitu své současné technické kapacity, což je 750 000 cestujících za den a nebude se moci vypořádat s populačním růstem v příštích letech. Baku by mělo růst ze současných 2,5 milionu obyvatel na 4 miliony v roce 2030.

K současným dvěma linkám, které jsou v provozu, by měli přibít další tři linky, a to linka modrá, fialová a žlutá. Přičemž stávající linky, zelená a červená, by se měly prodloužit a vytvořit tak optimální dopravu spolu s novými linkami.

Na obrázku 4 můžeme vidět stávající linky označené plnou čarou (zelená a červená) a linky plánované, označené čarou nevyplněnou (modrá fialová, žlutá a rozšíření zelené linky). Vyznačena je také stanice B 12, za kterou bude realizovaný odstavný tunel.



Obr. 4 Plán rozšíření linek metra v Baku [8]

Do roku 2030, na konci plánu rozšíření, by se mělo metro v Baku skládat z pěti linek o celkové délce 119 km. Propojovat budou 76 stanic s průměrnou vzdáleností 1,57 km.

Celkové rozdělení linek metra by mělo být následovné:

Červená linka:	29,8 km, 19 stanic (po prodloužení)
Zelená linka:	32,2 km, 19 stanic (po prodloužení)
Modrá linka:	17,6 km, 15 stanic (nová linka)
Fialová linka:	20,0 km, 12 stanic (nová linka)
Žlutá linka:	14,8 km, 11 stanic (nová linka)

3 Odstavný tunel za stanicí B12

Odstavný tunel se nachází za stanicí B12 fialové linky, která je hloubená. Navazuje na tuto stanici, a proto se nenachází v příliš velké hloubce. Tunel je navržen jako dvoukolejný, který umožňuje odstavení dvou za sebou zařazených vozů metra. Na konci tunelu se ponechává rezerva pro umístění bezpečnostních zarážedel.

3.1 Směrové řešení odstavného tunelu

Tunel je umístěn v oblouku za stanicí B12 v hustě obydlené oblasti (obr. 5).

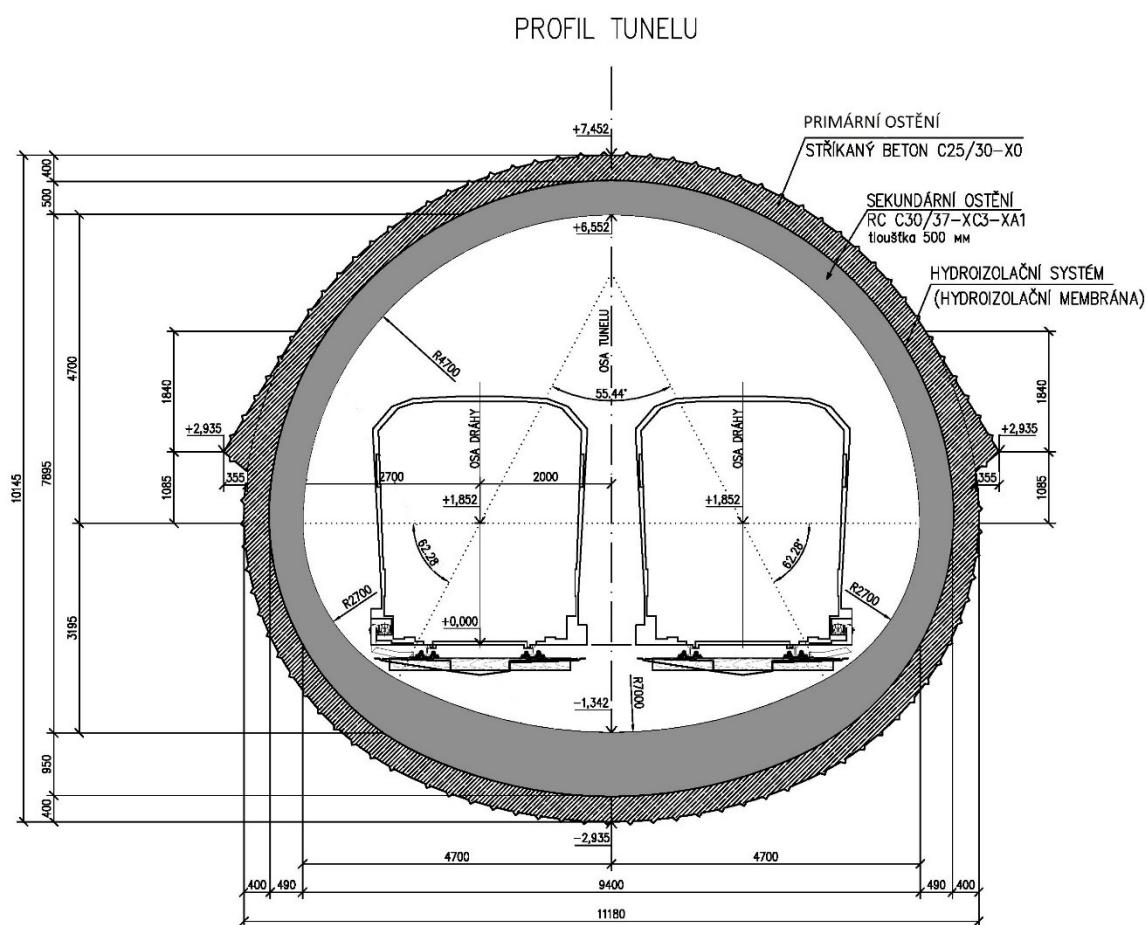


Obr. 5 Směrové řešení odstavného tunelu

V této lokalitě se vyskytují převážně rodinné domy a vily, které výškově nepřesahují tři nadzemní podlaží. V místech plánované trasy byly provedeny tři geologické vrty pro upřesnění geologických podmínek (obr. 5). Přesný výkres směrového řešení odstavného tunelu se nachází v příloze 1.

3.2 Profil odstavného tunelu

Profil odstavného tunelu je dán průjezdným profilem soupravy metra, která se na této trati provozuje (obr. 6). Průjezdný profil byl převzat z projektové dokumentace.



Obr. 6 Profil odstavného tunelu

Odstavný tunel bude realizován pomocí Nové rakouské metody. Profil tunelu je svým rozměrem určen pro dvě soupravy metra a tvoří ho primární a sekundární ostění, vyztužené stříkaným betonem a prostorovou výztuží. Mezi primární a sekundární ostění bude umístěn hydroizolační systém. Primární ostění bude jednotné svou tloušťkou 400 mm a sekundární ostění bude mít tloušťku 500 mm, přičemž u dna bude tato tloušťka rozšířena až na 950 mm.

Geometrii jednotlivých oblouků, primárního a sekundárního ostění, ze kterých je tunel složen, se nachází v příloze 2.

3.3 Inženýrsko – geologické podmínky

Geologické prostředí města Baku je značně proměnlivé. Vyskytují se zde zejména sedimenty kvartéru a neogénu. Neogén zastupují především jíly, které mohou dosahovat na některých místech mocnosti více než 100 m. Velmi časté jsou také vrstvy písků, vápenců nebo pískovců. Geologický průzkum potvrdil různorodost a střídání vrstev, které jsou ukloněny ke Kaspickému moři.

Hlavní geologickou vrstvou jsou v oblasti plánovaného odstavného tunelu a stanice B12 především neogenní jíly. Jedná se o jíly se střední a nízkou plasticitou. Při povrchu se nachází slabá vrstva kvartéru. Podle dostupného geologického průzkumu tvořeného z průzkumných vrtů a vyhotovených geologických řezů, byla odečtena tloušťka jednotlivých vrstev, nacházejících se v plánované trase odstavného tunelu. Svrchní vrstva je tvořena kvarterním pokryvem mocnosti 3 m, pod kterými se nachází mocná vrstva neogenních jílu. Tato vrstva zahrnuje jíly se střední plasticitou o mocnosti 5 m a jíly s nízkou plasticitou o mocnosti více než 40 m. Podélný geologický řez stanicí B12 se nachází v příloze 3.



Obr. 7 Standartní jádrový vrt P_DBH_122 (vrt v oblasti stanice B12)

Geotechnické parametry byly stanoveny na základě poměrně rozsáhlého inženýrsko – geologického průzkumu. Provedly se standartní jádrové vrty a také velký počet polních a laboratorních zkoušek (obr. 7).

Polní zkoušky realizované v rámci IG průzkumu, zahrnovaly například standartní penetrační zkoušku (SPT) a presiometrickou zkoušku. Z laboratorních zkoušek se jednalo hlavně o triaxiální zkoušky – UU, CU a oedometrické zkoušky.

3.4 Rizika spojená s ražbou odstavného tunelu

Ražba tunelu v přirozeném horninovém prostředí s sebou přináší vždy mnoho rizik. Žádná stavební díla totiž nezávisí tolik na horninovém prostředí, ve kterém se realizují, jako podzemní stavby. Horninové prostředí, na rozdíl od podzemních staveb, dílo ze všech stran obklopuje, a proto se také podílí na přenášení sil a deformací v okolí výrubu. Ty se dále projevují i deformacemi samotné výstroje výrubu a povrchu území.

Hlavním rizikem, které přináší ražba odstavného tunelu v těchto podmínkách, je deformace povrchu území. Velkými poklesy povrchu území jsou ohrožovány jak zástavba, tak inženýrské sítě.

Faktory ovlivňující velikost deformací jsou v tomto případě zejména nízké nadloží stavby, hustá povrchová zástavba a geologie území. Tyto faktory jsou téměř neovlivnitelné.

3.4.1 Rizika ražby s nízkým nadložím

Základní příčinou negativního ovlivnění povrchových objektů, v průběhu tunelování s nízkým nadložím, jsou deformace nadloží nad raženým dílem a vznik poklesové kotliny na povrchu území. U objektů, které jsou mělce uloženy, bývají povrchové deformace častým jevem, který má v zásadě dvě příčiny:

- deformace horniny okolo provedeného výrubu s tzv. ztrátou zeminy
- snížení podzemní vody v okolí výrubu tzv. drenážní efekt

Ztráta zeminy je dána deformacemi, které souvisejí se vznikem sekundární napjatosti při ražbě. Projevují se jednak radiálními deformacemi (konverencemi) po obvodě výrubu, jednak podélnými deformacemi čelby (extruzemi). Tyto deformace zvětšují objem zeminy proniklý do teoretického výrubu a zmenšují tím jeho velikost.

Neboť je nutno zachovat požadovaný profil, musí být přebytná zemina během ražby opakovaně likvidována. Důsledkem je, že se z výrubu těží více zeminy, než je teoreticky nutno. Při nízkém nadloží se to projeví vznikem deformační zóny nad podzemním dílem a poklesovou kotlinou na povrchu území. [4]

Snížení hladiny podzemní vody má za následek ztrátu vztlaku na zemní částice a tím dochází ke zvětšení efektivních napětí v zemině. Důsledkem toho dojde k deformačnímu sednutí zemního masivu, který se obvykle týká širší oblasti nad podzemním dílem. V případě navrhovaného odstavného tunelu nemůže dojít k drenážnímu efektu, protože z geologického hlediska je dílo umístěno v jemnozrnných zeminách (neogenních jílech). Jíly jsou nepropustné, a proto nemůže dojít k proudění vody. [4]

3.4.2 Rizika ražby z hlediska geologie

Ražba tunelu probíhá v prostředí jemnozrnných zemin. V místech realizace se nachází neogenní jíly střední a nízké plasticity. Jedná se o marinní třetihorní sedimenty, které jsou zastoupeny v celé oblasti města Baku.

Hlavní nepříznivou vlastností těchto zemin je nízká pevnost, která neumožňuje vytvoření přirozených horninových kleneb. Prakticky veškerá zatížení musí přenést ostění tunelu. Další negativní vlastností jílu je jejich velká plasticita a tím i výjimečně dlouhé deformační procesy. V průběhu ražby tedy vznikají velké objemové ztráty a to se plně projeví vznikem povrchové kotliny. [5]

3.4.3 Rizika ražby s hustou povrchovou zástavbou

Podzemní stavby s nízkým nadložím a s hustou povrchovou zástavbou jsou náchylné k sedání nadloží. Navíc v kombinaci se špatnými geologickými podmínkami se stává stavba velmi rizikovou z hlediska sedání a musí být na toto riziko brán zřetel.

Objekty povrchové zástavby, které se nacházejí nad podzemním dílem, musí být zmapovány. A to především z hlediska stáří, stavebního materiálu, hloubky založení a výšky objektu. Tyto objekty nesmí být během realizace stavby nijak poškozeny ani ovlivněny.

Součástí projektu by měl být návrh vhodného geotechnického monitoringu. Při použití Nové rakouské tunelovací metody bývá monitoring prováděn nejčastěji

tzv. Observační metodou. Průběh výstavby je kontinuálně monitorován a účinky razících prací na povrchovou zástavbu jsou průběžně porovnávány s předpoklady projektu.

Pro danou stavbu jsou vypracovány konkrétní varovné stavy a jejich opatření. Při dosažení hodnot některého z varovných stavů, se přijímá okamžité opatření pro minimalizaci vlivu ražby na povrch.

Geotechnický monitoring by měl zahrnovat jak podzemní stavbu, tak povrchové objekty.

Nedílnou součástí geotechnického monitoringu podzemní výstavby tunelu jsou konvergenční měření profilů primárního a sekundárního ostění tunelu, extenzometrická měření v okolí výrubu a další geodetická měření v podzemí (např. kontrolní měření tuhých prvků primárního ostění – nosníků HBX).

Povrchová měření zahrnují především nivelační měření bodů poklesové kotliny v profilech napříč poklesovou kotlinou, situovaných převážně kolmo k ose tunelových trub. Dále nivelační, náklonoměrná a deformetrická měření, která zahrnují monitoring výškových posunů sledovaných objektů, změn sklonu stavebních konstrukcí a deformace na objektech, v zónách předpokládaného negativního ovlivňování stavbou tunelu. Součástí může být také sledování vývoje poruch na ohrožených stavebních objektech, hluková měření, inklinometrická měření ve vrtech v trase tunelových trub a další.

3.5 Eliminace rizik ražby odstavného tunelu

Situování tunelu v prostředí neogenních jíílů, téměř neumožňuje využití samonosnosti horniny, resp. spolupůsobení systému „ostění – hornina“. Tunel je navíc veden pod nízkým nadložím a hustou zástavbou. Je proto vhodné navrhnout takový technologický postup výstavby, který nežádoucí deformace ostění a následně i nadloží eliminuje.

Tunelovací metody jsou v současnosti prováděny cyklickým způsobem, kde se jednotlivé operace razícího cyklu opakují, nebo kontinuálním způsobem, kde se dílo profilově razí pomocí speciálního plnoprofilového razícího stroje. [12]

Cyklické způsoby ražby, označované jako metody konvenční, jsou realizované výhradně prstencovým systémem ražení. Jejím nejběžnějším představitelem je Nová rakouská tunelovací metoda (dále jen NRTM), kterou bude odstavný tunel realizován. [13]

Velikost deformací nadloží a povrchu území při použití NRTM souvisí především s následujícími aspekty ražby:

- členění výrubu
- předstihová opatření prováděné před čelbou
- tuhost primárního ostění
- rychlost zabudování primárního ostění do výrubu (technologická prodleva)

Nejpodstatněji lze ovlivnit deformace na povrchu území členěním výrubu a předstihovými opatřeními prováděnými před čelbou. [13]

3.5.1 Členění výrubu

Členění výrubu rozdělí čelbu díla na úseky, které jsou postupně odtěžovány a vyztužovány.

Rozeznáváme dva základní způsoby členění výrubu:

- horizontální členění výrubu
- vertikální členění výrubu

Horizontální členění výrubu se používá v jednoduchých geologických podmínkách, kdy razíme v horninách kvalitnějších, bez přítomnosti větších přítoků podzemní vody. Při tomto členění je čelba pobírána v jednotlivých fázích výstavby horizontálně a dále vyztužována. Tento typ členění není vhodný pro nekvalitní jemnozrnné plastické zeminy. Důvodem nevhodnosti jsou velké deformace v okolí výrubu při odtěžení celé kaloty (stupně) najednou. Výsledkem těchto deformací je sedání povrchu území a vznik poklesové kotliny. V kvalitnějších horninách se tohoto členění využívá hlavně z důvodu technologického, pro malý dosah razících strojů. [15]

Vertikální členění výrubu se využívá ve složitějších geologických podmínkách, kdy ražení probíhá v masivech špatné kvality. Pobírání čelby zde probíhá v jednotlivých

fázích výstavby vertikálně. V určitých případech je výhodné vertikální a horizontální členění kombinovat. [13]

Pro omezení deformací výrubu a povrchu území je výhodné použít vertikálního členění výrubu, kde jsou poklesy povrchu území značně nižší (ztráta zeminy $< 1\%$). U horizontálního členění dosahují poklesy větších hodnot (ztráta zeminy $> 2\%$).

V případě numerického modelu odstavného tunelu bude klasické horizontální členění výrubu sloužit pouze pro srovnání s členěním vertikálním, které je v tomto případě vhodnější.

3.5.2 Předstihová opatření prováděná před čelbou

Pokud ražba tunelu prochází obtížnými geologickými podmínkami, je nutné výrub zajistit co nejdříve, uzavřeným primárním ostěním dostatečné únosnosti. Tím zajistíme rozvolňování masivu a vzniku dvojsoých stavů napjatosti. Je však nutné umožnit horninovému masivu určitá přetvoření a tím předejít koncentracím napětí okolo výrubu. Jedním ze způsobů jak prodloužit dobu nutnou k zabezpečení výrubu, je navrhnout vhodné členění výrubu. Pokud ovšem ani vhodné členění výrubu nestačí, je možné dobu potřebnou k vyztužení prodloužit zkrácením zabírky, nebo se musí přikročit k předstihovým opatřením prováděným před čelbou díla. [14]

Stabilizační předstihová opatření rozeznáváme zejména:

- jehlování
- ochranné deštníky
- ochranné klenby ze subhorizontálních sloupů tryskové injektáže
- zajištění čelby dlouhými zainjektovanými tyčovými prvky
- zajištění čelby horizontálními tzv. zámkovými sloupy z tryskové injektáže

Jehlování je metoda, při které jehly vytvářejí okolo výrubu rošt, zabráňující vypadávání úlomků horniny a dodržení tvaru výrubu. Napomáhá vytvoření nosného prstence horniny – horninové klenby. Jehly jsou obvykle z betonářské oceli o průměru tyčí 22 -32 mm o délce až 4 m. Jehla musí spočívat z jedné strany na oblouku a z druhé musí být v dostatečné míře zakotvena v rostlé hornině. Jehly se osazují po každém záběru, čímž se dosahuje jejich dvojnásobného až trojnásobného překrytí v každém průřezu. V měkkých, tlačivých nebo sypkých zeminách může být použit souvislý plášť ocelových pažnic. Nejčastěji

se používají pažnice typu Union. Jehly se osazují nasucho nebo do cementové malty a pro jejich zarážení se využívá pneumatických nebo hydraulických kladiv. [13]

Ochranné deštníky se používají v horninovém prostředí s krátkodobou stabilitou a to hlavně v příportálových úsecích s nízkým nadložím. Nejprve se vytvoří nad trasou tunelu umělá ochranná klenba ve formě tzv. „deštníku“ a poté se pod touto ochranou začíná razit samotný tunel. Ochrana díla deštníky má vliv především na zvýšení bezpečnosti práce při ražbě a omezení sedání povrchu. Běžně používanými v praxi jsou rourové a mikropilotové deštníky. [6]

Rourové deštníky jsou vytvořeny z ocelových silnostěnných rour o průměru 60 – 200 mm, které jsou perforované, což umožňuje zainjektovat mezery mezi rourou a stěnou vrtu cementovou maltou. Osazují se v osových vzdálenostech 0,3 - 0,4 m. Minimální požadovaný přesah rourových deštníků před čelbou tunelu je 4,0 m a jejich délka může dosahovat až 20 m. Podle zastižených geologických podmínek se nosné roury zasouvají buď do hotových vrtů, nebo do výpažnice ve vrtu a se dodatečně vyplní betonem. [13]

Mikropilotové deštníky slouží k zajištění stability při průchodu podzemního díla pod nadložím. Jsou většinou navrhovány vodorovné a sledují profil raženého díla. Mikropiloty se provádí do zapaženého nebo nezapaženého vrtu, který je zapažen cementovou směsí a vystrojen silnostěnnou trubkou. V praxi se mohou požit piloty injektované po celé délce pomocí jednotlivých etází, případně piloty osazené pouze do cementové zálivkové směsi. Pro injektáž se běžně používá cementová injekční směs. Mikropilotové deštníky se provádí z portálů podzemních děl nebo z jejich čeleb v průběhu ražby díla (obr. 8). [12]

Ochranné klenby ze subhorizontálních sloupů tryskové injektáže se mohou realizovat v široké škále zemin a poloskalních hornin, protože struktura se směsí narušuje. Při této metodě paprsek injekční směsi proudí pod vysokým tlakem přes trysky a rozpojuje horninu na jednotlivé úlomky nebo zrna, přičemž dochází k jejich vzájemnému mísení a tunutí v požadovaném tvaru horizontálního sloupu. Pronikání injekční směsi proto není podmíněné velikostí pórů ani stupněm nakypření. Jílovité zeminy velmi výrazně snižují pevnost zainjektovaného sloupu zeminy, proto je doporučeno zeminu z vrtu zcela odstranit. Injektovaný sloup je poté tvořen pouze injekční cementovou suspenzí vhodného složení. [7]

Injekční deštníky se realizují v délkách 15 – 18 m a v jednom deštníku bývá 30 -35 vrtů. Vrty se provádějí obkročno, nejdříve párové vrty, potom nepárové. Tak aby alespoň část deštníku měla čas v předstihu ztvrdnout. Deštníky by se měli překrývat přibližně o 4 m. [13]

Zajištění čelby se provádí obvykle dlouhými zainjektovanými tyčovými prvky. Provádí se pomocí různých typů kotev, hojně používané jsou sklolaminátové kotvy (např. Rockbolt), které se dobře plení. Toto opatření zabraňuje extruzi čelby a vzniku nadvýmů. Zajištění čelby se provádí postupně při každém kroku ražby. Vhodné požití zajišťovacích kotev je především při malém nadloží a ztížených geologických podmínkách.

Při velmi ztížených geologických podmínkách může být použito zajištění čelby aplikací horizontálních sloupů z tryskové injektáže. Provádění je obdobné jako u deštníků tryskové injektáže.



Obr. 8 Mikropilotový deštník portálu tunelu (trať Votice – Benešov u Prahy) [10]

4 Variantní návrh postupu ražby odstavného tunelu

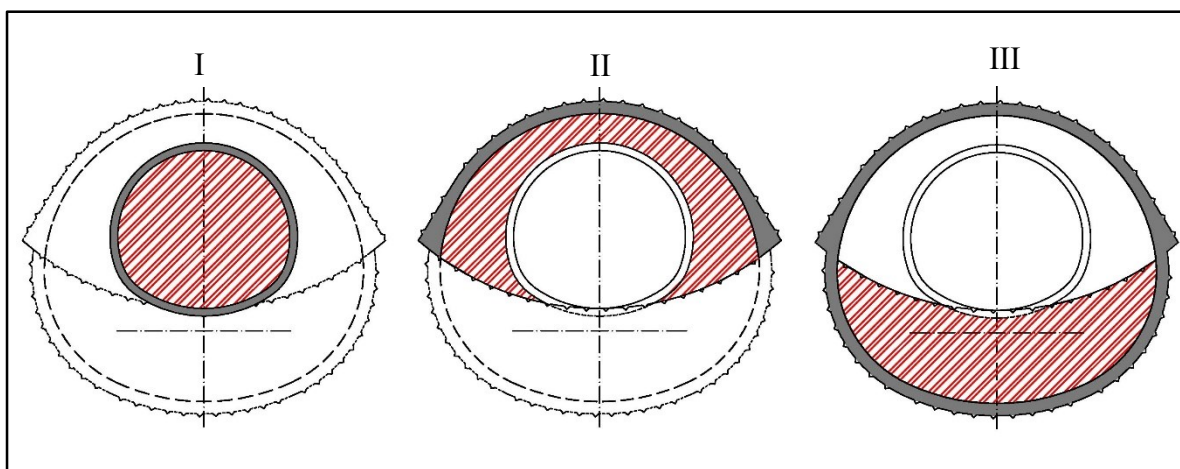
Odstavný tunel za stanicí B12 je situován pod hustou zástavbou a nízkým nadložím. Cílem návrhu je proto omezit v co největší možné míře deformace v okolí výrubu a tím i deformace na povrchu. K určení nejvhodnějšího postupu ražby bude rozpracováno pět variant ražeb, zejména s ohledem na sedání povrchu.

První varianta členění výrub horizontálně, přičemž v kalotě je výhodně umístěna pilotní štola, která omezuje deformace. Druhý způsob ražby se provádí vertikálním členěním s ponechaným opěrným pilířem z horniny. Třetím typem členění dosáhneme vertikálního rozdělení výrubu. Čtvrtý způsob ražby kombinuje horizontální a vertikální členění, kde se kalota rozděluje na dva dílčí úseky vertikálně a dno se posléze razí jako celek. Pátá varianta ražby, která bude realizována klasickým horizontálním členěním výrubu, bude sloužit pouze pro srovnání s ostatními variantami.

Jednotlivé varianty ražeb budou navrženy včetně předstihových opatření, která budou prováděna v jednotlivých fázích výstavby před čelbou.

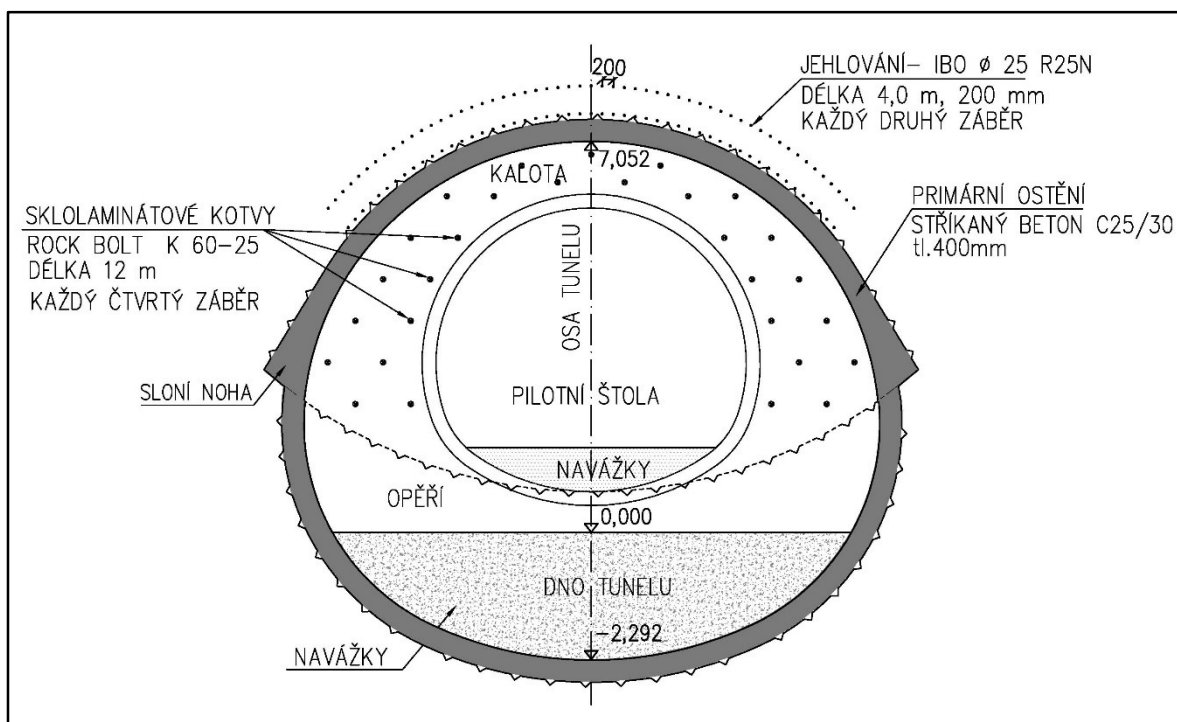
4.1 Ražba horizontálním členěním výrubu s pilotní štolou

V této navržené variantě se výrub člení horizontálně na kalotu, opěří a dno. Do kaloty je umístěna pilotní štola. Jednotlivé postupy ražby se budou cyklicky střídat v pořadí znázorněném na obrázku 9. Ve fázi I bude vyražena a vyztužena pilotní štola, ve fázi II kalota a ve fázi III opěří a dno tunelu.



Obr. 9 Jednotlivé fáze ražby - horizontální členění s pilotní štolou

Jako předstihové opatření před čelbou tunelu se vytvoří nad teoretickým obrysem kaloty díla ochranná dvouřadá klenba jehlováním ze samozávrťavacích kotev typu IBO R25N. Délka tyčí je navržena 4 m a rozteč činí 200 mm. Instalace kotev probíhá v každém čtvrtém záběru. Navrhovaný typ opatření je přebrán z projektové dokumentace. Po realizaci ochranné klenby se vyrazí pilotní štola, která se následně vyztuží stříkaným betonem C25/30 o tloušťce 200 mm. Uvnitř pilotní štoly se vytvoří provizorní dno z navážek, z důvodu pojezdu razících mechanismů. V dalším kroku je nutné zajistit čelbu kaloty proti extruzi zeminy pomocí sklolaminátových kotev typu Rock Bolt K 60-25 délky 12 m. Kotvy budou instalovány v každém čtvrtém záběru. Po zajištění čelby je možné odebrat postupně celou kalotu až ke dnu pilotní štoly. Primární ostění v kalotě tvoří stříkaný beton C25/30 tloušťky 400 mm, do kterého se postupně umisťují kari sítě a prostorová výztuž typu BTX. Nakonec dochází k vyražení opěří a dna tunelu a následnému vyztužení. Výztuž primárního ostění opěří a dna je stejná jako výztuž primárního ostění kaloty. Opět je nutné vyložit dno navážkami a vytvořit tak vhodný pracovní povrch. Odebírání kaloty a pilotní štoly se realizuje po zabírkách dlouhých 1 m. Opěří a dno tunelu bude postupovat po zabírkách dlouhých 2 m. Příčný řez tunelu spolu s předstihovým zajišťovacími pracemi je znázorněn na obrázku 10. Celý postup ražby, pomocí tohoto členění výrubu, je patrný z přílohy 4.

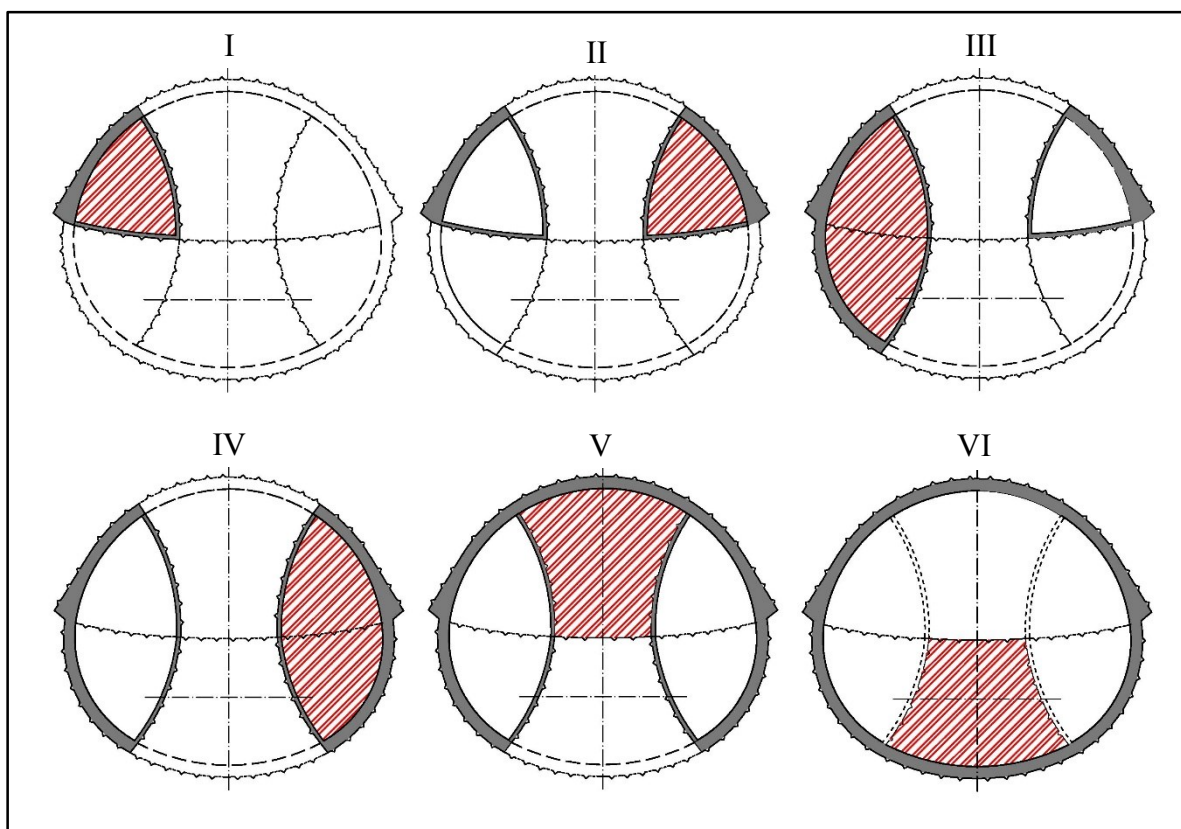


Obr. 10 Příčný řez tunelem - horizontální členění s pilotní štolou

4.2 Ražba vertikálním členěním výrubu s ponechaným jádrem horniny

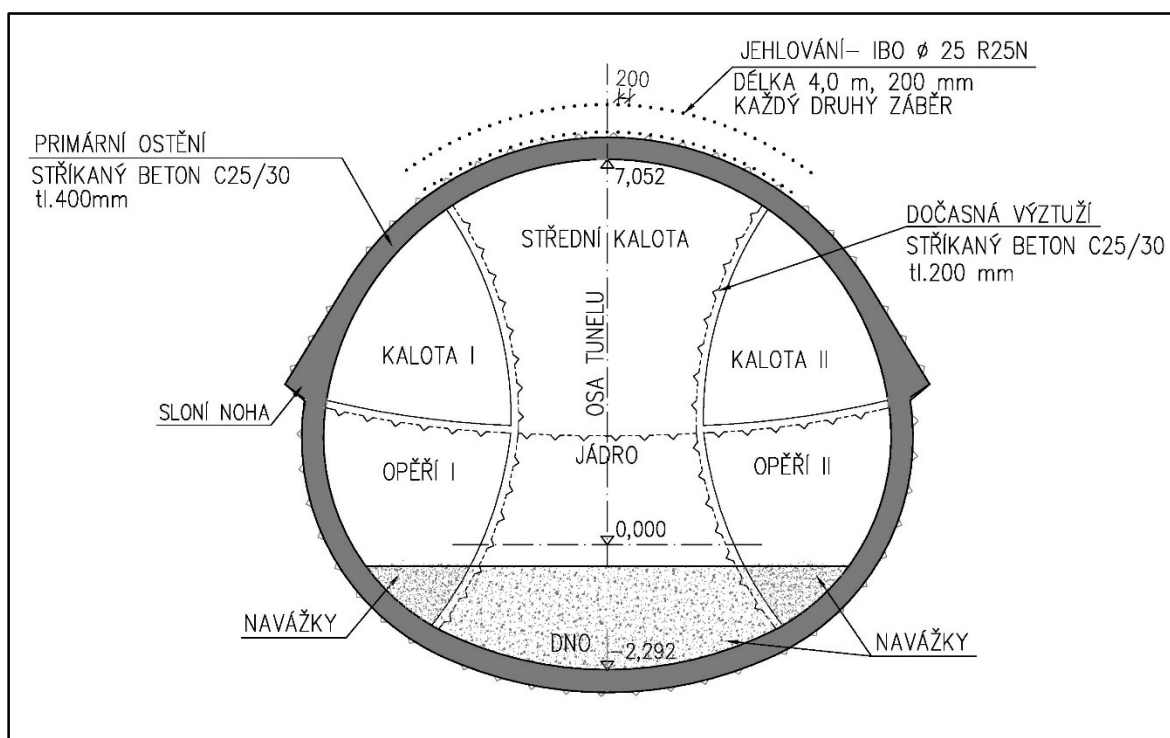
Tato metoda se hojně využívá ve spojení s NATM. Největší výhodou tohoto členění výrubu je ponechaný opěrný pilíř horniny, který významně eliminuje deformace výrubu. Ražba bočními rozrážkami v předstihu navíc umožňuje ověření předpokládané geologie.

Postup ražby se bude cyklicky střídat podle schématu znázorněného na obrázku 11. V první fázi se bude provádět levá boční rozrážka s následným vyztužením. Dále ve fázi II se realizuje rozrážka na pravé straně tunelu. Ve fázích III a IV se rozrážky na obou stranách prohlubují a vyztužují. V páté fázi se po částech odebírá kalota za současného vytváření nájezdové rampy pro strojní mechanismy. Postupně se odstraňuje dočasná výztuž kaloty. Při konečné fázi ražby dochází k odstranění spodní dočasné výztuže, odtěžení rampy a uzavření oblouku.



Obr. 11 Jednotlivé fáze ražby – vertikální členění v. s ponechaným jádrem horniny

Stabilizačním opatřením se opět stala ochranná klenba, vytvořená jehlováním. U této varianty se však klenba umísťuje jen nad jádro tunelu, které bude nejvíce zatíženo. Prvky, rozteče i délky zůstávají shodné. Ražba je započata boční rozrážkou kaloty I, která se vyztužuje stříkaným betonem, armovacími sítěmi a prostorovou výztuží typu BTX. Dále se realizuje a vyztužuje kalota II. V dalším kroku se kalota I prohloubí až ke dnu tunelu a také vyztuží. Na dno se uloží navážky, které vyrovnávají povrch pro další pojezdy strojních mechanismů. Stejným způsobem se realizuje i kalota II, vyražením a vyztužením opěří a dna II. V této fázi výstavby jádro tunelu tvoří opěrný pilíř z horniny, který pomáhá snížit vertikální deformace výrubu. Posléze se jádro začne odtěžovat v místě střední kaloty včetně dočasné výztuže. Současně se začne vytvářet rampa pro výjezd strojních mechanismů. S dalšími postupy se odtěží i dočasná výztuž opěří a oblouk tunelu se uzavře primárním ostěním. Dno tunelu je opět vysypáno navážkami. Příčný řez tohoto členění je popsán na obrázku 12 a celý postup ražby je rozpracován v příloze 5.

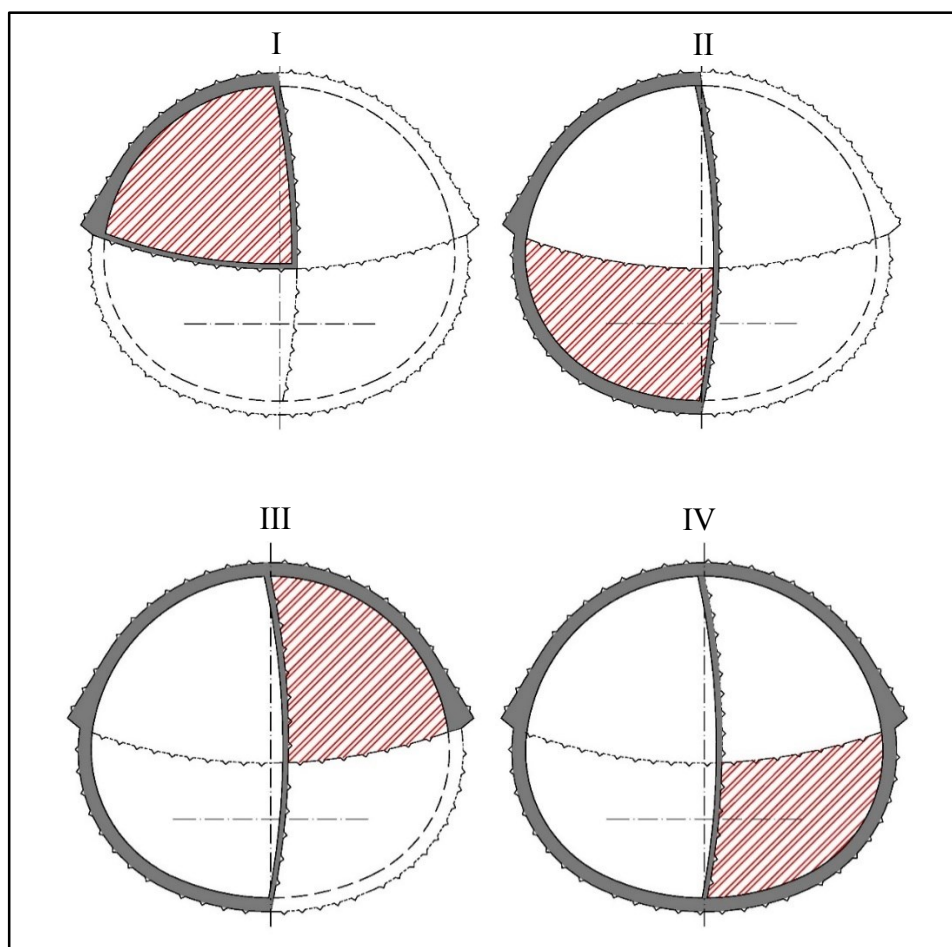


Obr. 12 Příčný řez tunelem – vertikální členění v. s ponechaným jádrem horniny

4.3 Ražba vertikálním členěním

Ražba vertikálním členěním probíhá pobíráním a vyztužováním výrubu ve vertikálním směru. Tímto způsobem je možné docílit poměrně příznivějších hodnot deformací, jak okolo výrubu tak následně i na povrchu. Je to dáno tím, že kalota není odebrána celá najednou, jako je tomu u horizontálního členění, ale postupně. V tomto případě je nutné výrub rozdělit i horizontálně a to z důvodu technologického, pro lepší dosah strojních mechanismů.

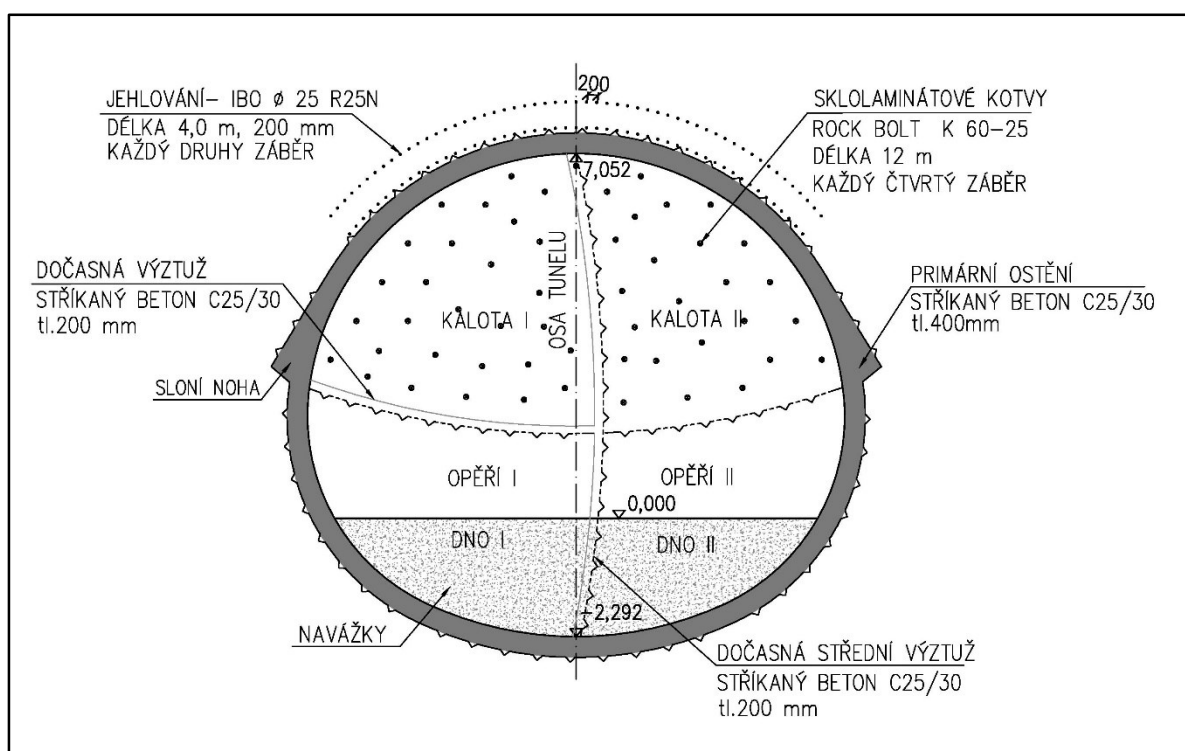
Výrub se člení na kalotu, opěří a dno. Postup razících cyklů je patrný z obrázku 13. První fáze začíná vyražením části kaloty a vyztužením. Ve druhém kroku se bude pokračovat prohlubováním a vyztužováním opěří až ke dnu tunelu. Následně může být započata realizace druhé kaloty. Dále se postupuje opět až ke dnu za stálé opory stření dočasné výztuže (fázi IV). Nakonec dojde k uzavírání oblouku a dočasná výztuž se trvale odstraní.



Obr. 13 Jednotlivé fáze ražby – vertikální členění výrubu

Jednotlivé fáze ražby budou vždy začínat pod ochranou klenbou vytvořenou jehlováním. Kalota I a II se zajišťují kotvami. Stabilizační prvky mají stejné parametry jako v případech uvedených výše. Po realizaci stabilizačních opatření před čelbou tunelu se vyrazí a vyztuží kalota I. Primární ostění zde tvoří stříkaný beton (tl. 400 mm), armovací síť a prostorová výztuž typu BTX. Spodní klenba kaloty I bude zastříkána betonem (C25/30, tl. 200 mm), z důvodů zvýšení stability. Dále bude vyhloubeno a vyztuženo opěří a dno I. Dno I musí být vyloženo navážkami tvořícími vhodný povrch pro pojezdy strojních mechanismů. Při dalším postupu se vyhloubí a vyztuží kalota II. Následně se vyhloubí, pod stálou opěrou dočasné střední výztuže, opěří a dno II. Během dovyztužování celého oblouku je možné začít střední výztuž postupně odstraňovat.

Příčný řez je zpracován na obrázku 14 a celý postup ražby vypracován v příloze 6.

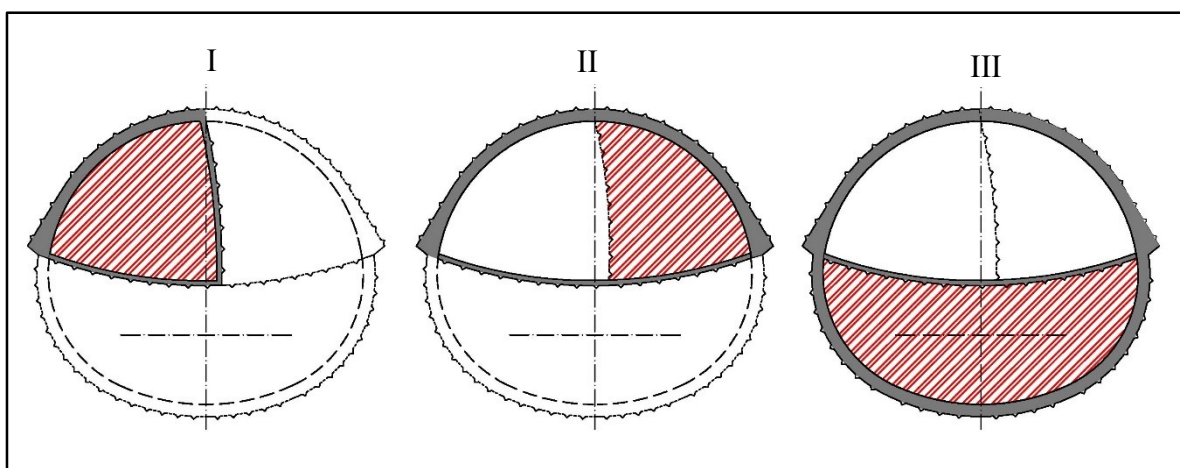


Obr. 14 Příčný řez tunelem – vertikální členění výrubu

4.4 Ražba kombinovaným členěním výrubu

Ražba probíhá kombinací vertikálního a horizontálního členění výrubu. Výrub se člení na kalotu I a II, opěří a dno. Kalota je záměrně rozdělena na dvě části, které budou raženy postupně za sebou. Díky rozdělení kaloty zamezíme většímu rozvolnění horninového masivu a větším deformacím.

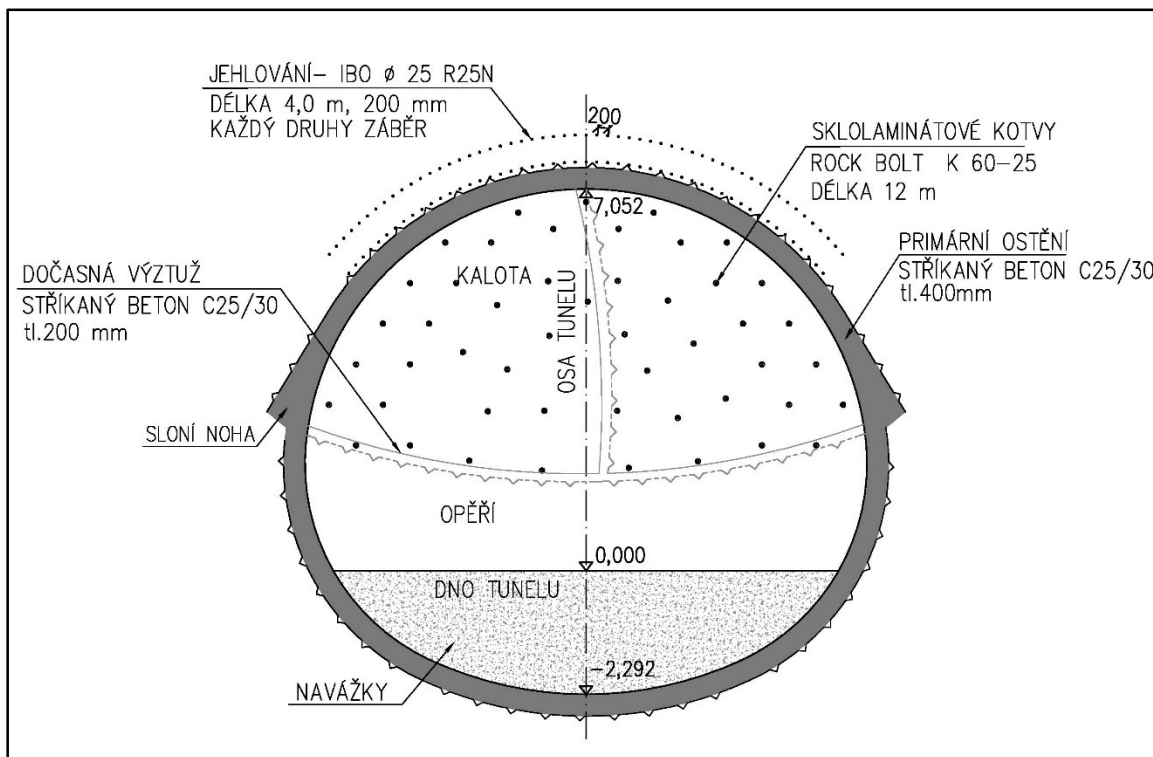
Ražba je započata odebráním kaloty I a jejím následným vyztužením (fáze I). Postupným odebíráním a vyztužováním kaloty II (fáze II), získáme celkovou vyraženou kalotu. V konečné fázi vyrazíme a vyztužíme opěří a dno.



Obr. 15 Jednotlivé fáze ražby – kombinované členění výrubu

Předstihová opatření, zahrnující jehlování a stabilizační kotvy v čelbě, jsou obdobná jako v předešlých případech. V tomto případě je kotvami proti extruzi zeminy zajišťována čelba kaloty I a II vždy po každém čtvrtém záběru. Po zajištění díla předstihovými opatřeními může být vyražena kalota I. Po té následuje vyztužení primárního ostění stříkaným betonem C 25/30 tloušťky 400 mm. U dna a středu kaloty bude z důvodu stability jako dočasná výztuž použit stejný typ stříkaného betonu tloušťky 200 mm. Primární ostění zde tvoří stříkaný beton, armovací síť a prostorová výztuž typu BTX. V dalším postupu je vyražena kalota II a odstraněna střední pomocná výztuž. Dále probíhá instalace primární výztuže a zastříkání dna kaloty II betonem C 25/30. Nakonec může být odtěženo opěří a dno tunelu při současném odstraňování dočasné výztuže dna kaloty. Primární ostění opěří a dna může být dokončeno. Dno tunelu musí být vyloženo vhodným materiálem pro pojezdy strojních mechanismů.

Příčný řez tohoto členění je popsán na obrázku 16 a celý postup ražby je rozpracován v příloze 7.



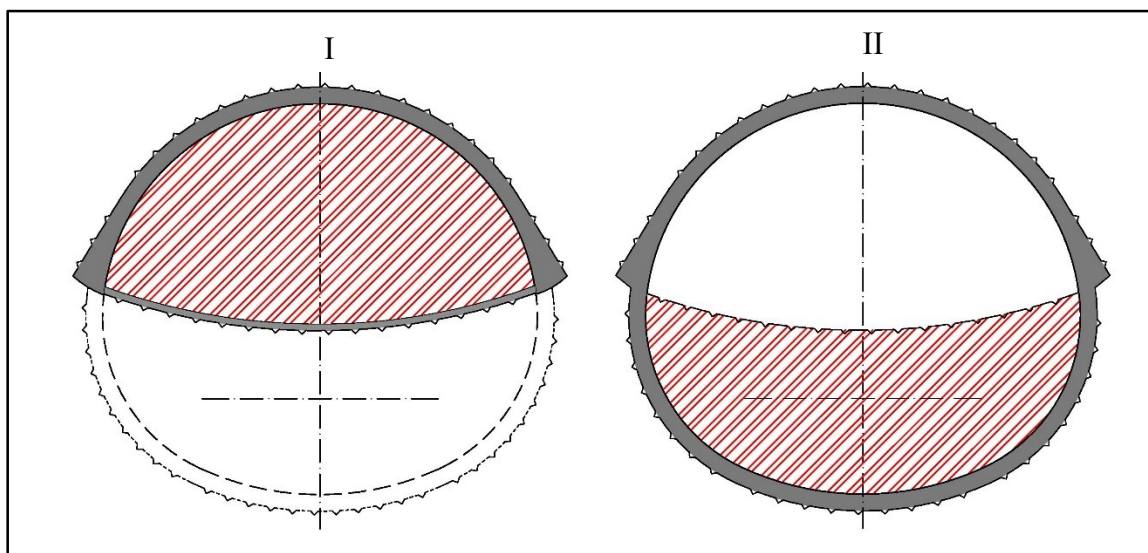
Obr. 16 Příčný řez tunelem - kombinované členění

4.5 Ražba horizontálním členěním výrubu

Klasický způsob členění výrubu vertikálně je vhodné použít v dobrých geologických podmínkách. Obvykle se aplikuje z důvodu technologického, při potřebě zmenšit výšku pracovního prostoru z důvodů potřebného dosahu strojních mechanismů. Tato navržená metoda ražení nemá velký vliv na zmírnění deformací na povrchu. Ražba horizontálním členěním výrubu bude sloužit pro srovnání s ostatními navrženými variantami, které jsou do těchto podmínek vhodnější.

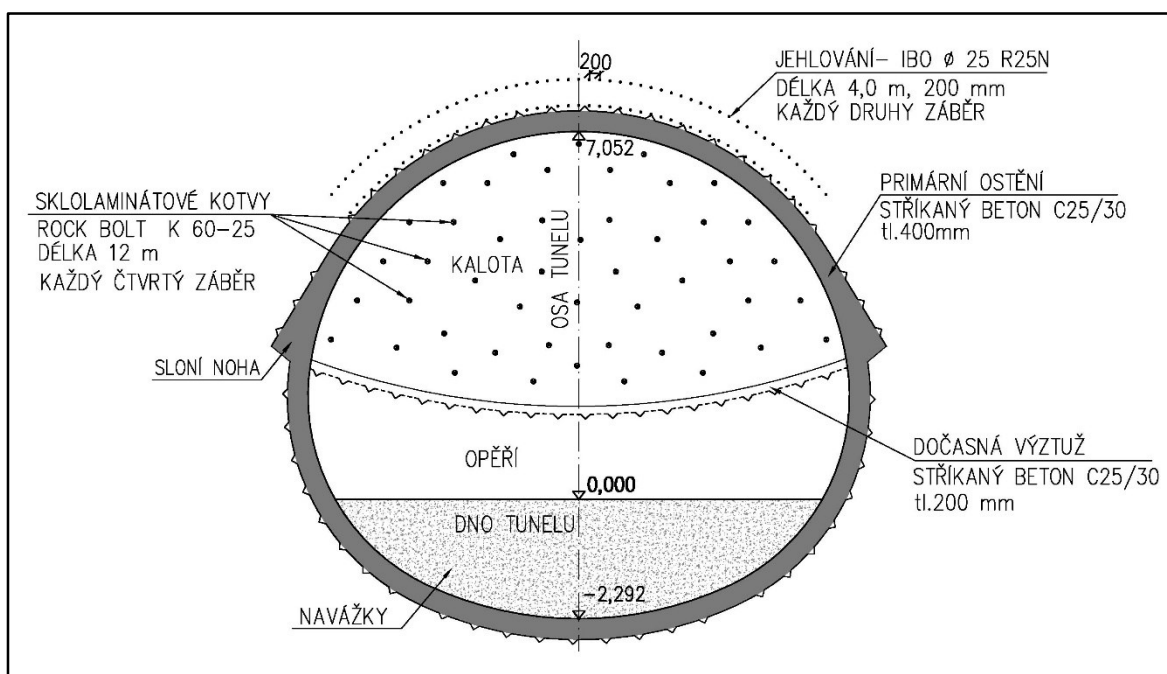
Výrub je při ražbě horizontální členěním rozdělen na kalotu a dno. Jednotlivé postupy ražby se cyklicky střídají v daném pořadí znázorněném na obrázku 17. V první fázi bude odebrána a vyztužena kalota a ve fázi druhé dno.

Předstihová opatření se neliší od předešlých variant, typ i délka použitých prvků zůstává stejná. Jehlování bude probíhat po každém druhém záběru a osazování kotev při každém čtvrtém záběru. Po realizaci ochranných opatření se vyrazí kalota, která se následně vyztuží.



Obr. 17 Jednotlivé fáze ražby - horizontální členění

Primární ostění kaloty tvoří stříkaný beton (C25/30 tl. 400 mm) a kari síť s průběžnou se instalací prostorové výztuže typu BTX. Jako dočasná protiklenba bude realizováno i zastříkání dna kaloty (stříkaný beton C25/30 tl. 200 mm). V dalším kroku se vyrazí dno tunelu a opět zajistí primárním ostěním, stejným typem jako v případě kaloty. Příčný řez tunelem můžeme vidět na obrázku 18. Kompletní postup ražby je zpracovaný v příloze 8.



Obr. 18 Příčný řez tunelem - horizontální členění

5 Matematický model odstavného tunelu v 2D

Matematické modely všech pěti variant ražeb jsou zpracovány v programu, využívající metodu konečných prvků, Plaxis version 8.0. V těchto modelech budou sledovány především deformace v okolí výrubu a na povrchu. Varianta ražby, jejíž sedání vyjde nejpříznivěji, bude dále zpracováno v 3 D modelu programem Midas GTS.

5.1 Úvod k matematickému modelování metodou MKP, program Plaxis

Metoda konečných prvků (Finite Element Method) je numerická metoda modelování kontinua a má využití pro širokou oblast inženýrských problémů. V současnosti zastává důležité místo v podzemním stavitelství, především pro simulaci průběhů deformací u podzemního díla. Základním elementem této metody je prvek konečných rozměrů. Řešená oblast se rozděluje na konečný počet podoblastí – prvků (diskretizace). Pro každý typ prvku, existuje kromě dimenze a tvaru, charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Nejvyužívanějším tvarem prvku této metody je trojúhelník. Uzly sítě jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení. Hustota a topologie prvků významně ovlivňuje kvalitu výsledků a potřebnou kapacitu pro řešení. [14]

Plaxis version 8.0 je program zaměřený na 2D analýzu napětí – deformačního a stabilitního stavu geotechnických konstrukcí. Je možné volit různé konstituční modely pro odlišné geotechnické problémy. Program nám poskytuje realistickou simulaci výstavbových etap podzemního díla. [11]

Pracovní prostředí tohoto programu je poměrně přívětivé, sestává se ze tří základních pracovních částí. Vytvoření modelu umožňuje modul *INPUT*, do kterého se postupně zadávají vstupní data: geometrie, parametry jednotlivých materiálů a okrajové podmínky. Důležitým vstupním údajem je také zadání hladiny podzemní vody a výpočet počátečních podmínek tzv. initial conditions. Na počáteční stav dále navazují další fáze výpočtu. V modulu *CALCULATION* se definují jednotlivé fáze výpočtu podle simulace etap výstavby. Po zadání všech fází výstavby je model připraven k výpočtu. Pokud proběhl výpočet bez problémů, může být použit modul výstupu *OUTPUT*. Tento modul poskytuje kompletní vizuální model, ve kterém můžeme detailně sledovat deformace, napětí a tlaky působící na konstrukci podzemního díla. [11]

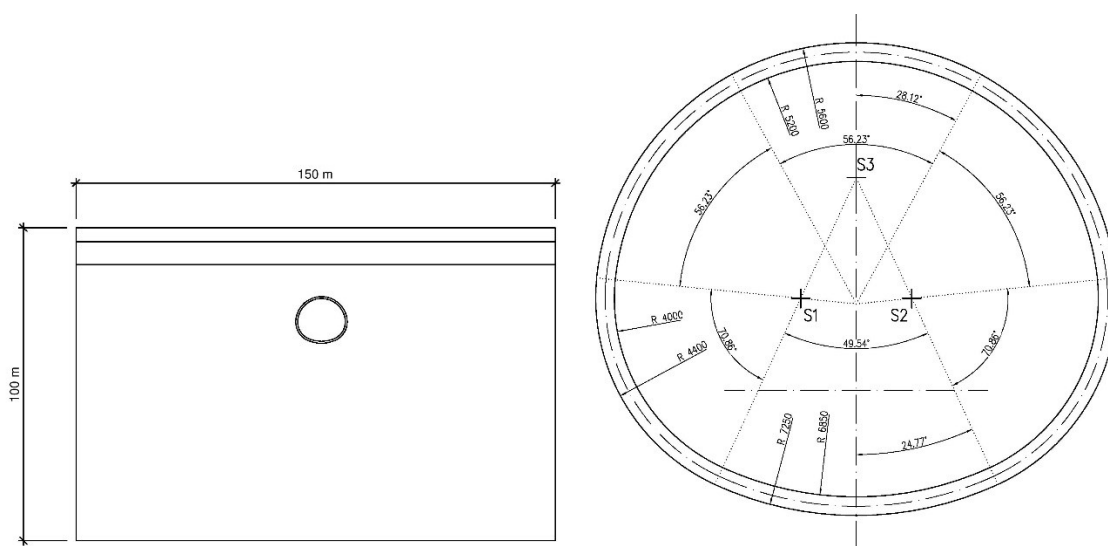
5.2 Tvorba modelu

Model byl vytvořen v příčném řezu za stanicí B12. Nadloží odstavného tunelu bylo velmi nízké, jen 15 m. Geologický profil byl složen převážně z jílu střední a nízké plasticity, nad kterými se nacházela slabá vrstva kvartérních sedimentů. Pevnostní a přetvárné vlastnosti jednotlivých zemin byly stanoveny podrobným inženýrsko – geologickým průzkumem (tab. 1).

INPUT – zadání vstupních parametrů

GEOMETRIE MODELU

Geometrie modelu byla odvozena z projektové dokumentace a upravena pro vhodné importování do programu. Podélný geologický řez poskytl informace o tloušťkách jednotlivých vrstev zeminy a ty byly nainportovány do programu spolu s členěním výrubu pomocí základních bodů. V modelu je zastoupen kvartérní pokryv o tloušťce 3 m a jíly se střední plasticitou o tloušťce 5m, vrstva v níž se razilo, byly jíly nízké plasticity. Tyto body se v programu spojily s použitím funkce line. Samotný tunel byl vytvořen funkcí tunnel designer. Tvorba tunelu probíhala na základě postupného zadávání poloměrů a úhlů oblouků, ze kterých je tunel vytvořen. Dosah zón působení modelu neboli rozměr úlohy byl stanoven 10D vertikálně i horizontálně.



Obr. 19 Základní geometrie a rozměry modelu odstavného tunelu

MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

Pro reálnou simulaci výstavbového procesu je nutné správně zadat parametry použitých materiálů a jejich konstituční modely. V sekci material sets je možné zadat jednotlivé zeminy, ve kterých je dílo umístěno a použité výztužné prvky. Ve všech navržených variantách ražby byly použity tyto materiálové sady:

Soil and interfaces – Do programu byly v této funkci zadány zeminy kvarterní pokryv, jíl se střední plasticitou, jíl s nízkou plasticitou (tab1,2).

<i>Zemina</i>	γ [kN/m]	E_{def} [MPa]	ν [-]	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	R_{int} [-]	K_0 [-]	$k_x=k_y=k_z$ [m/d]
<i>Kvartérní pokryv</i>	20	7,5	0,3	20	10	1,0	0,5	0,12

Tab. 1 Materiálové charakteristiky zemin (konstituční model Mohr Coulomb)

<i>Parametry zemin</i>	<i>Jíl s nízkou plasticitou</i>	<i>Jíl se střední plasticitou</i>
$\gamma = \gamma_{sat}$ [kN/m ³]	20	20
E_{50}^{Ref} [MPa]	15	30
E_{oed}^{Ref} [MPa]	12	24
E_{ur}^{Ref} [MPa]	45	90
P_{Ref} [kPa]	100	100
c' [kPa]	0	0
ϕ' [°]	23	25
ψ [°]	0	0
R_{int} [-]	1,0	1,0
m [-]	0,25	0,25
c_{inc} [kN/m ² /m]	0,8	0,8
$K_{0,nc}$ [-]	0,65	0,65
$k_x=k_y=k_z$ [-]	0,022	0,0015

Tab. 2 Materiálové charakteristiky zemin (konstituční model Hardening soil)

Konstituční modely těchto zemin se lišily. Kvarterová vrstva se posuzovala podle konstitučního modelu *Mohr Coulomb* a jíly podle modelu *Hardening soil*. Mohr Coulomb je lineárně elastický – perfektně plastický konstituční model. Vyžaduje zadání minimálně 5 vstupních parametrů (E_{def} , ν , ϕ_{ef} , γ , c_{ef}). Hardening soil je elasto – plastický konstituční model s dvojitým objemovým a smykovým zpevněním u něhož je potřeba více vstupních parametrů.

Důležitým vstupem je také rozhodnutí zda má materiál odvodněné nebo neodvodněné chování. V případě kvarterního pokryvu jde o odvodněné chování prostředí (typ *DRAINED*), avšak u jílu se jedná o neodvodněné chování (typ *UNDRAINED A*), kdy může docházet k vzniku zvýšených pórových tlaků vlivem zatěžování. Vývoj pórových tlaků u typu *UNDRAINED A* je dominantním faktorem určujícím průběh efektivní dráhy napětí a tím i výslednou neodvodněnou smykovou pevnost. [11]

Plates – Funkce plates umožňuje zadání charakteristik deskových prvků. V tomto případě se jedná o zadání primárního ostění odstavného tunelu a pomocného ostění pro vyztužování celků při jednotlivých fázích ražby (tab. 3).

<i>Ostění</i>	<i>EA</i> [kN/m]	<i>EI</i> [kNm ² /m]	<i>d</i> [m]	<i>ν</i> [-]	<i>w</i> [kN/m/m]	<i>model</i>
<i>primární</i>	11,6+E6	154,7+E3	0,4	0,2	10	elastic
<i>pomocné</i>	11,6+E6	154,7+E3	0,2	0,2	5	elastic

Tab. 3 Materiálové charakteristiky primárního ostění

GENEROVÁNÍ SÍŤE KONEČNÝCH PRVKŮ

Síť konečných prvků byla vygenerována pomocí 15 uzlových trojúhelníkových prvků podle zásad triangulace. Vytvoření sítě proběhlo za použití funkce *mesh* a dále se použilo funkce *refine cluster* pro zjemnění sítě v oblastech očekávaných velkých změn, především samotné tunelové trouby. Pro každou navrženou variantu ražby byla síť vygenerována jednotlivě.

OKRAJOVÉ PODMÍNKY

V modelu byly použity standartní okrajové podmínky tzv. tuhá vana. Boční hrany modelu jsou zajištěny proti vodorovnému posunu a na spodní straně modelu je bráněno oběma složkám posunu.

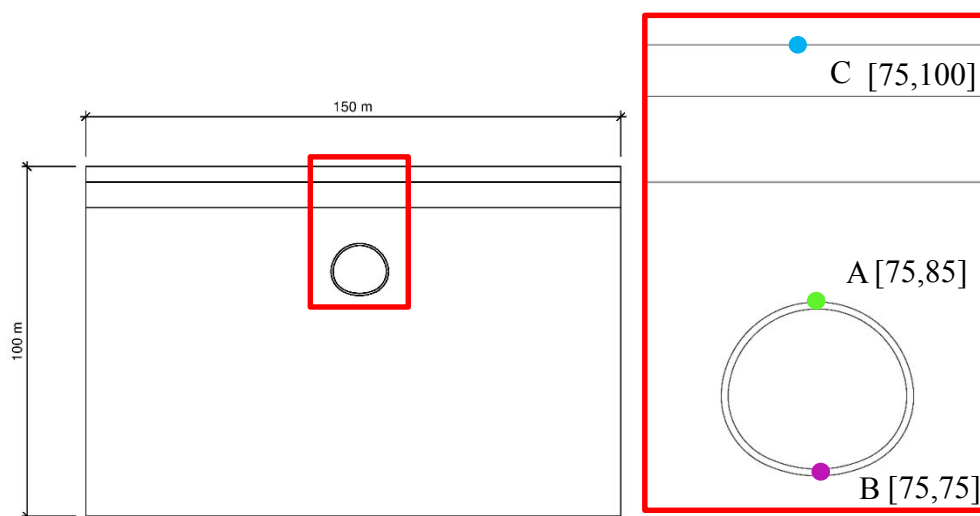
VÝPOČET – CALCULATION

V modulu *calculation* se nadefinovaly jednotlivé fáze výstavby, které se pro každou variantu ražby lišily. Jednalo se o fáze výrubu, které střídalo zajištění. Fáze výstavby budou popsány u každé varianty zvlášť. Z důvodu transparentnosti modelu byl namodelován pouze proces výstavby. [11]

Každý výpočet vychází z iniciační fáze (*Initial phase*), která se odvíjí od horninového prostředí, ve kterém je dílo umístěno. Tato fáze simuluje horninové prostředí před započítáním výstavby. Každá fáze navazuje na předchozí fázi a také z ní vychází. [11]

VÝSTUP – OUTPUT

Výsledky z programu jsou uspořádány v grafické podobě, ve formě grafů a zřetelných obrázků. Sledováno bylo zejména celkové sedání, znázorněné v řezech. Dále byly uvedeny celkové vertikální deformace a také deformace ve třech zvolených bodech. Sledované body byly rozmístěny do kaloty tunelu (bod A), dna tunelu (bod B) a na povrch území nad kalotou tunelu (bod C). U těchto bodů můžeme pozorovat závislost velikostí vertikálních deformací v závislosti na fázi výstavby, ve které se ražené dílo právě nachází. Numerický model poskytl také informace o totálních deformacích a čerpání pevnosti.



Obr. 20 Schéma sledovaných bodů svislých posunů

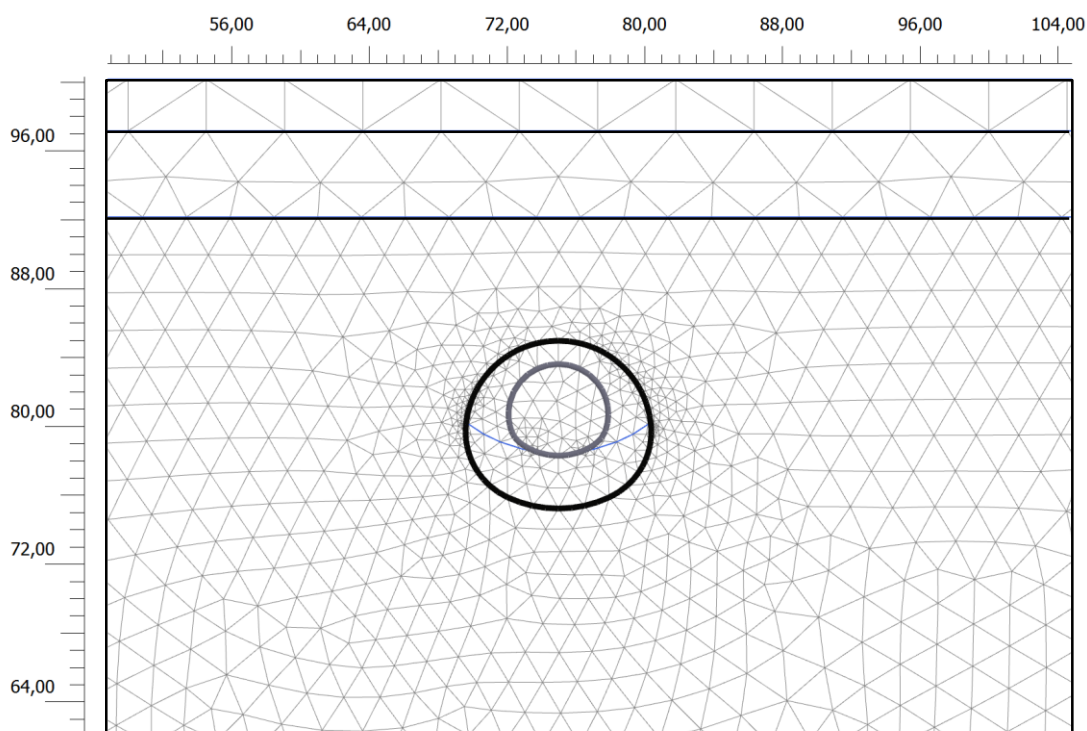
5.3 Model jednotlivých variant ražby odstavného tunelu

5.3.1 Ražba pilotní štolou

Fáze ražby, probíhající horizontálním členěním s pilotní štolou, byly podrobně popsány v kapitole 4. 1. Jde o postup, kde je ražena nejprve pilotní štola, poté kalota a nakonec opěří a dno. Příčný a podélný řez raženého díla se nachází v příloze 4. V této kapitole je popsána tvorba sítě modelu, výpočet a výsledky numerického modelu této varianty ražby.

- IMPUT

Základní geometrie modelu a materiálové charakteristiky se neliší a jsou rozebrány v kapitole 5.2, tab. 1,2. Síť byla vygenerována pomocí 15 uzlových trojúhelníkových prvků a zjemněna podle potřeby kolem tunelové trouby (obr. 21).



Obr. 21 Síť numerického modelu – ražba pilotní štolou

- CALCULATION

Ve výpočetním modulu byly nadefinovány jednotlivé fáze ražby, které byly detailně rozebrány v kapitole 4.1.

1. Fáze: Iniciační fáze

- horninové prostředí zůstane aktivováno v celém prostoru modelu
- typ výpočtu: K0 procedure

2. fáze: Výrub pilotní štoly

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{\text{stage}}=0,3$
- zadáno: výrubem pilotní štoly
- typ výpočtu: plastic

3. fáze: Vyztužení pilotní štoly

- zadáno: výrubem pilotní štoly a aktivací ostění pilotní štoly
- typ výpočtu: plastic

4. fáze: Výrub kaloty

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{\text{stage}}=0,3$
- zadáno: výrubem pilotní štoly a deaktivací ostění pilotní štoly a výrubem kaloty
- typ výpočtu: plastic

5. fáze: Primární ostění kaloty

- zadáno: výrubem pilotní štoly, výrubem kaloty a aktivací primárního ostění kaloty

6. fáze: Výrub opěří a dna

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{\text{stage}}=0,3$
- zadáno: výrubem pilotní štoly, výrubem kaloty, výrubem dna a opěří
- typ výpočtu: plastic

7. fáze: Primární ostění opěří a dna

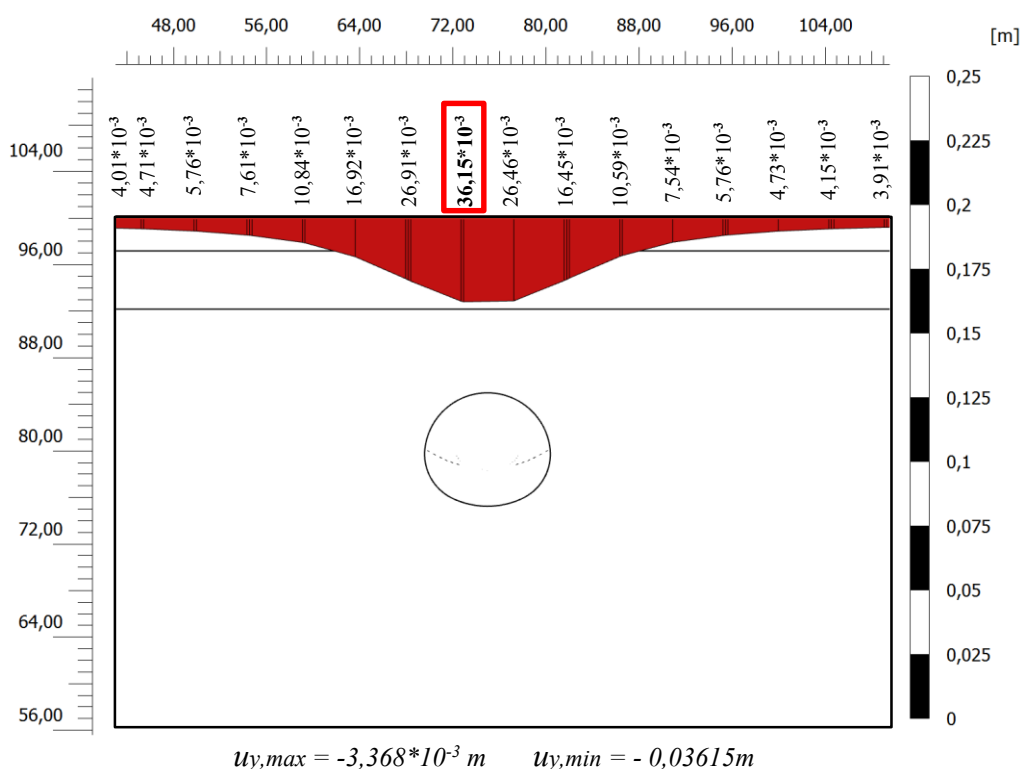
- zadáno: výrubem pilotní štoly, výrubem kaloty, aktivací primárního ostění kaloty, výrubem dna a opěří a aktivací jeho primárního ostění
- typ výpočtu: plastic

- OUTPUT

Směrodatné výsledky modelu byly, při výpočtech zaměřených na sedání, především hodnoty sedání v řezu a dále také hodnoty vertikálních deformací vybraných bodů. Jako další významné výsledky modelu byly vybrány hodnoty totálních deformace vyraženého díla, vertikálních deformací a čerpání pevnosti.

SEDÁNÍ

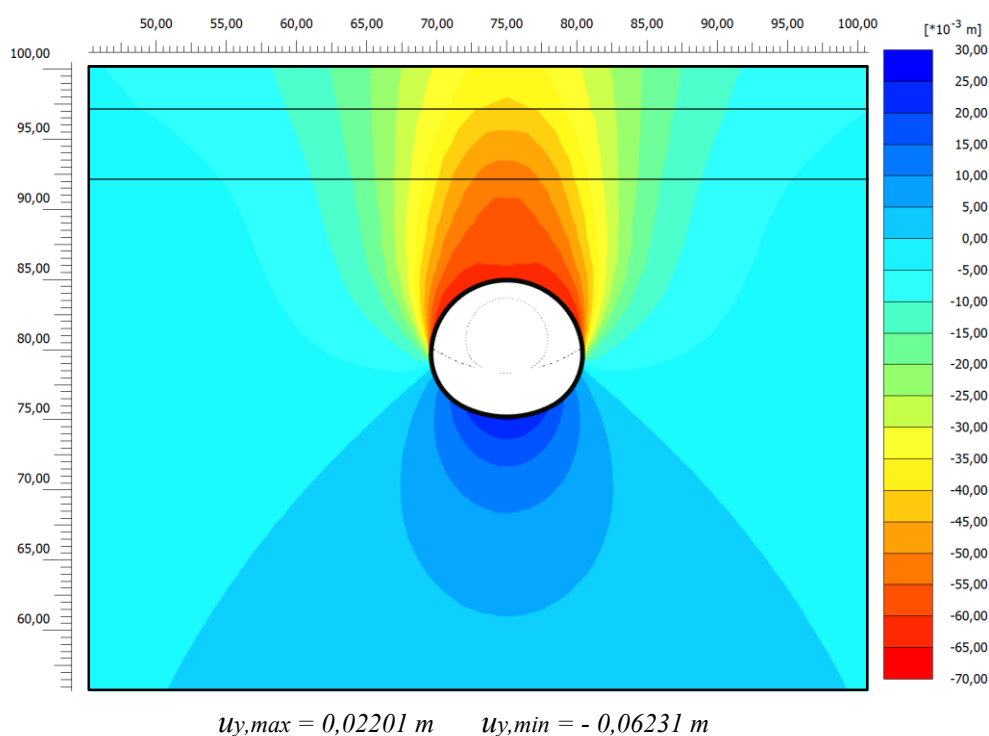
V řezu provedeném na modelu můžeme sledovat vývoj poklesové kotliny a její rozsah. Průměrná šířka poklesové kotliny činí přibližně 98 m. Největšího poklesu dosahuje oblast nad vrcholem kaloty díla, která má hodnotu 3,67 cm. Toto sedání se zmenšuje s narůstající vzdáleností od díla až na téměř ustálenou hodnotu poklesu 0,34 cm, v rámci navrženého modelu. Vývoj této poklesové kotliny je téměř rovnoměrný, hodnoty mají obdobnou tendenci klesání v obou směrech.



Obr. 22 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem - ražba pilotní štolou

VERTIKÁLNÍ DEFORMACE

Na průbězích vertikálních deformací je namáháno zejména přístropí kaloty a boky kaloty (červeně znázorněné deformace), což je dáno ve velké míře hlavně odtěžením kaloty díla, které proběhlo po odebrání pilotní štoly. V této fázi vznikaly největší vertikální deformace. V dalších fázích výstavby, kde se postupně odebíralo opěří a dno, nebyly už deformace tak velké. Naproti tomu lze pozorovat mírné zvedání dna (modře znázorněné deformace), které je patrné i z grafu deformací (graf 1).



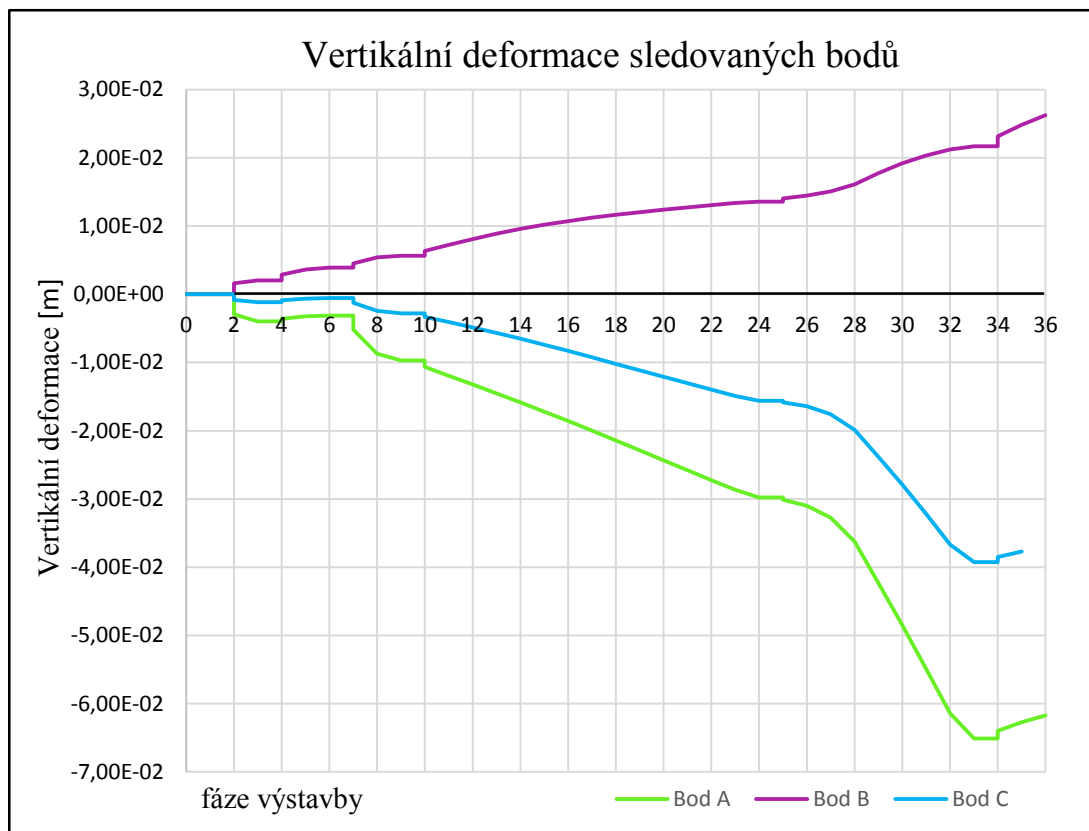
Obr. 23 Vertikální deformace u_y - ražba pilotní štoly

Svislé deformace byly znázorněny také na vybraných bodech, jejichž rozložení v modelu je znázorněno v kapitole 5. 2. Jednalo se o bod A (ve vrcholu kaloty díla), bod B (v počvě díla) a bod C (na povrchu území, ve stejné rovině jako body A a B). U těchto bodů je sledována závislost sedání v závislosti na dané fázi výstavby (graf 1).

V následujícím grafu můžeme sledovat průběh deformací, který začíná vyražením pilotní štoly a počátečním nárůstem deformací – fáze výstavby 2. Ve fázi čtvrté dochází k vyztužení pilotní štoly a k mírnému zmenšení deformací. Dále můžeme sledovat prudší nárůst deformací ve fázi 7, kdy je odtěžena celá kalota včetně pilotní štoly. Tato deformace

se zvětšuje postupně až do fáze 10 (vyztužení kaloty díla), kde opět můžeme pozorovat zvýšení deformací. Ve fázi 25 je vyraženo dno a dále se deformace plynule zvětšují až do vyztužení dna, které probíhá v kroku 34 a končí krokem 36.

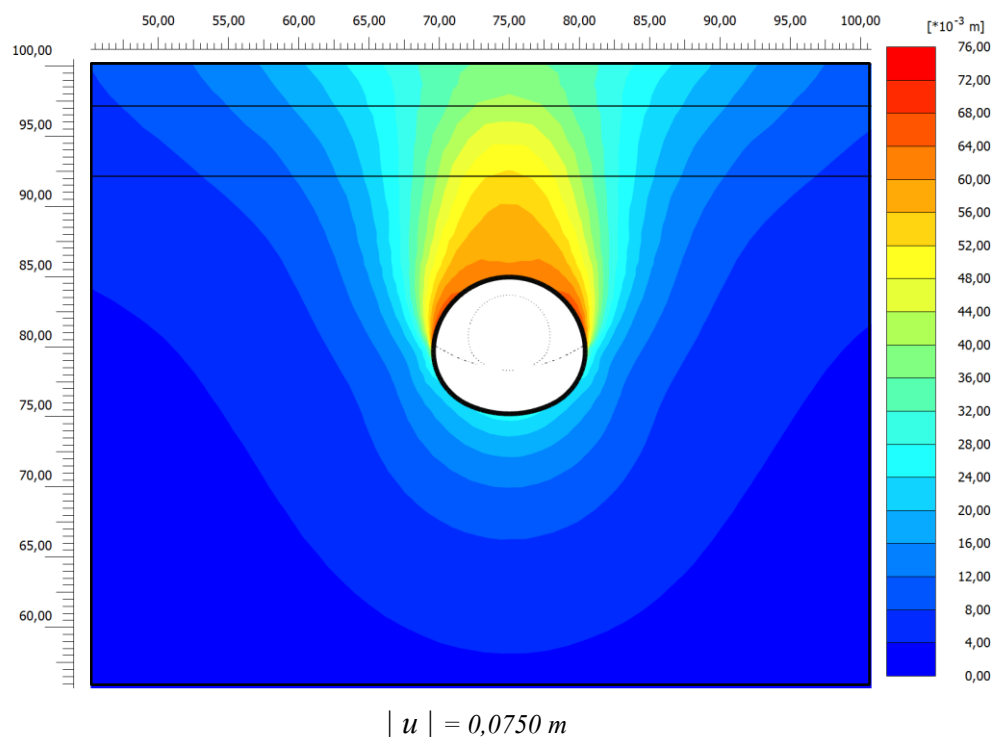
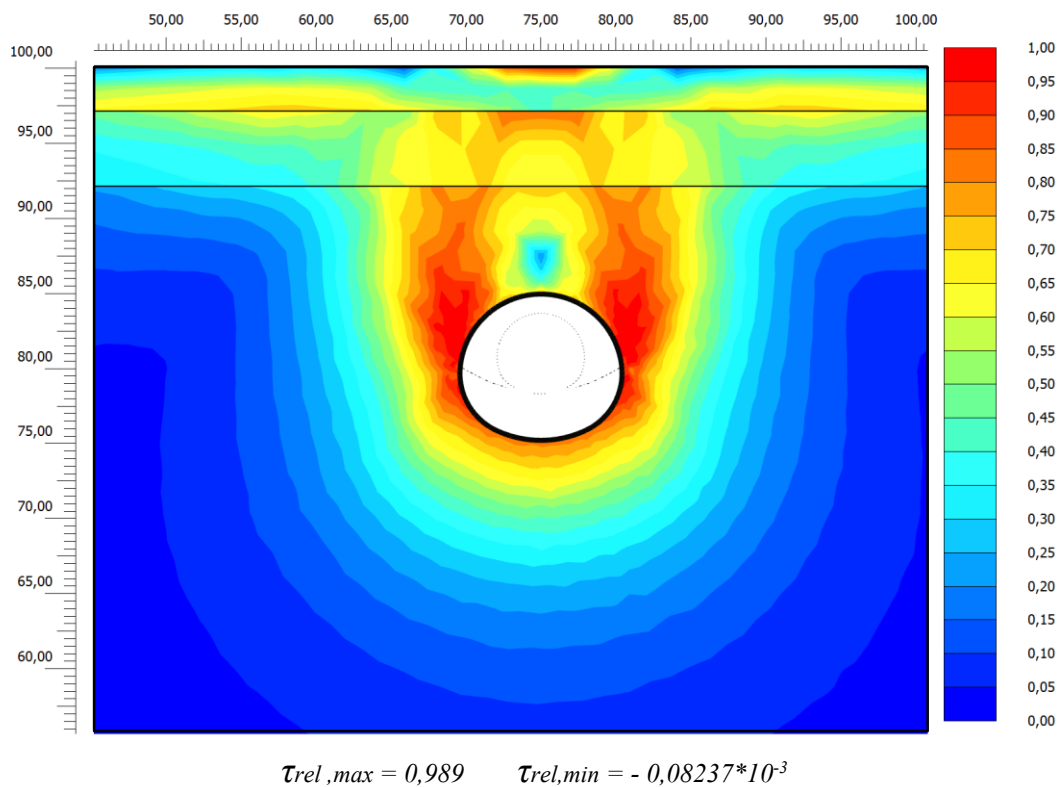
Celkově největšího nárůstu vertikálních deformací, pokud se zaměříme na bod C, který leží na povrchu území, dosáhla ražba ve fázi ražby a vyztužení kaloty. Tyto fáze můžeme z hlediska deformací shledat jako nejvýznamnější.



Graf 1 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba pilotní štolou

TOTÁLNÍ DEFORMACE

Během ražby dochází k postupnému odebírání zeminy a tím i odlehčení masivu, to způsobuje vznik deformací směrem do výrubu. Totální deformace dosahují svých maximálních hodnot $u = 0,075$ m, v přístropí a na bocích kaloty. Největších hodnot deformace nabývají při odebírání a vyztužování kaloty. Ve vrcholu díla brání větším posunům pilotní štola, díky které je oblast kaloty v průběhu ražby zpevněná.

Obr. 24 Totální deformace u - ražba pilotní štolou**ČERPÁNÍ PEVNOSTI**

Obr. 25 Čerpání pevnosti – ražba pilotní štolou

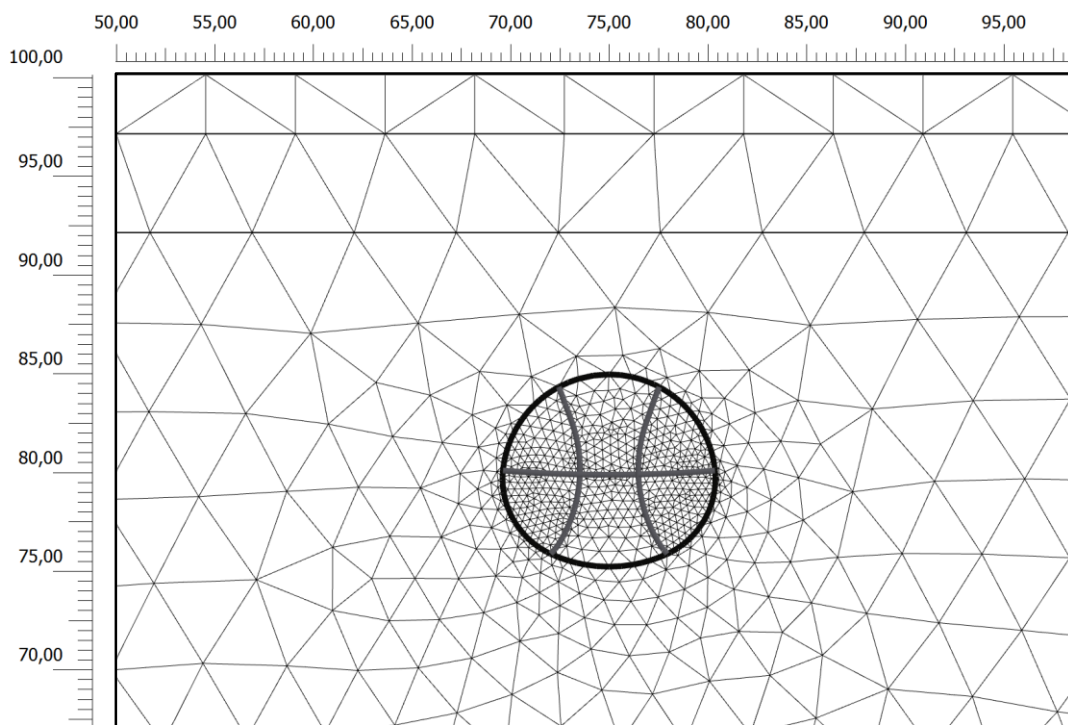
Čerpání pevnosti probíhá zejména na bocích díla v oblasti opěří a méně pak v oblasti dna. Největšího čerpání pevnosti tento model dosahoval opět při odebírání kaloty a jejím vyztužování. V bocích díla můžeme sledovat čerpání pevnosti k mezní hodnotě 1. Taktéž u povrchu je vidět čerpání pevnosti k mezní hodnotě.

5.3.2 Ražba vertikálním členěním s ponechaným jádrem horniny

Ražba je založena na vytvoření nosného pilíře z horniny, výrub se člení na kalotu I, II, opěří I, II, střední kalotu, jádro a dno. Varianta byla detailně popsána v kapitole 4.2. Příčné a podélné řezy se nachází v příloze 5. Dále bude popsána tvorba sítě modelu, jeho výpočetní fáze a výstupy.

- IMPUT

Základní geometrie modelu a vstupní materiálové charakteristiky se nemění. Sít' modelu byla opět vytvořena 15 uzlovými trojúhelníkovými prvky a byla podle potřeby zjemněna (obr. 26).



Obr. 26 Sít' numerického modelu – ražba vertikálním čl. s opěrným jádrem

- **CALCULATION**

Ve výpočetním modulu byly nadefinovány jednotlivé fáze ražby, které byly detailně rozebrány v kapitole 4.2.

1. Fáze: Iniciační fáze

- horninové prostředí zůstane aktivováno v celém prostoru modelu
- typ výpočtu: K0 procedure

2. Fáze: Výrub kaloty I

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty I
- typ výpočtu: plastik

3. Fáze: Výztuž kaloty I

- zadáno: výrubem kaloty I, aktivace výztuží kaloty I a výztuží dna kaloty I
- typ výpočtu: plastik

4. Fáze: Výrub kaloty II

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrub kaloty I, aktivace výztuží kaloty I a dna kaloty I a výrubem kaloty II
- typ výpočtu: plastik

5. Fáze: Výztuž kaloty II

- zadáno: výrub kaloty I, II, aktivace primární a pomocné výztuže kaloty I, II, aktivace pomocné výztuže dna kaloty I, II
- typ výpočtu: plastik

6. Fáze: Výrub opěří I

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrub kaloty I, II, aktivace primární a pomocné výztuže kaloty I, II, deaktivace pomocné výztuže dna kaloty I, aktivace pomocné výztuže dna kaloty II, výrubem opěří I
- typ výpočtu: plastik

7. Fáze: Výztuž opěří I

- zadáno: výrub kaloty I, II, aktivace primární a pomocné výztuže kaloty I, II, aktivace pomocné výztuže dna II, výrubem opěří I, aktivací primární a pomocné výztuže opěří I
- typ výpočtu: plastik

8. Fáze: Výrub opěří II

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrub kaloty I, II, aktivace primární a pomocné výztuže kaloty I, II, deaktivace pomocné výztuže kaloty II, výrubem opěří I, II, aktivací primární a pomocné výztuže opěří I,
- typ výpočtu: plastik

9. Fáze: Výztuž opěří II

- zadáno: výrub kaloty I, II, aktivace primární a pomocné výztuže kaloty I, II, výrubem opěří I, II, aktivací primární a pomocné výztuže opěří I, II,
- typ výpočtu: plastik

10. Fáze: Výrub střední kaloty

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty I, II, aktivací primární výztuže kaloty I, II, deaktivací pomocné výztuže kaloty I, II, výrubem opěří I, II, aktivací primární a pomocné výztuže opěří I, II, výrubem střední kaloty
- typ výpočtu: plastik

11. Fáze: Primární výztuž střední kaloty

- zadáno: výrubem kaloty I, II, aktivací primární výztuže kaloty I, II, výrubem opěří I, II, aktivací primární a pomocné výztuže opěří I, II, výrubem střední kaloty a aktivací primárního ostění střední kaloty
- typ výpočtu: plastik

12. Fáze: Výrub jádra a dna

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,$

- zadáno: výrubem kaloty I, II, aktivací primární výztuže kaloty I, II, výrubem opěří I, II, aktivací primární výztuže opěří I, II, deaktivací pomocné výztuže opěří I, II, výrubem střední kaloty a aktivací primárního ostění střední kaloty, výrubem jádra a dna
- typ výpočtu: plastik

13. Fáze: Primární výztuž dna

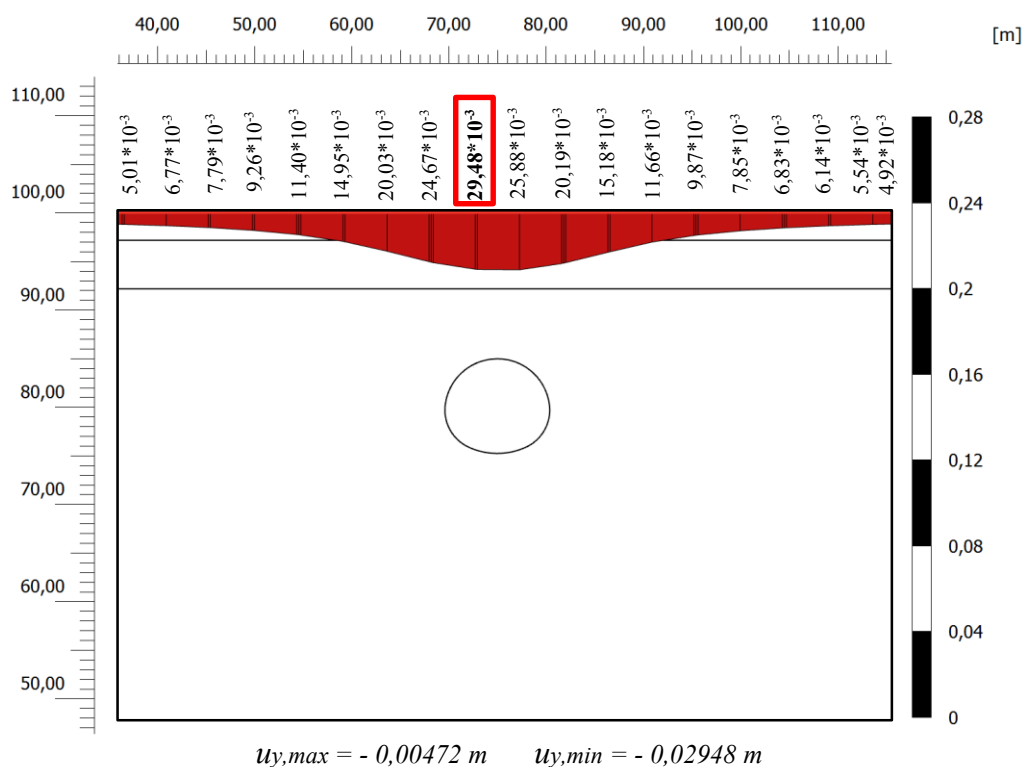
- zadáno: výrubem kaloty I, II, aktivací primární výztuže kaloty I, II, výrubem opěří I, II, aktivací primární výztuže opěří I, II, výrubem střední kaloty a aktivací primárního ostění střední kaloty, výrubem jádra a dna a aktivací jeho primárního ostění
- typ výpočtu: plastik

• OUTPUT

Výsledky byly, s ohledem na lepší srovnání všech navržených variant, vybrány opět hodnoty sedání, totální deformace a vertikální deformace.

SEDÁNÍ

Vývoj sedání u této varianty ražby, je o něco příznivější než v předchozím návrhu.

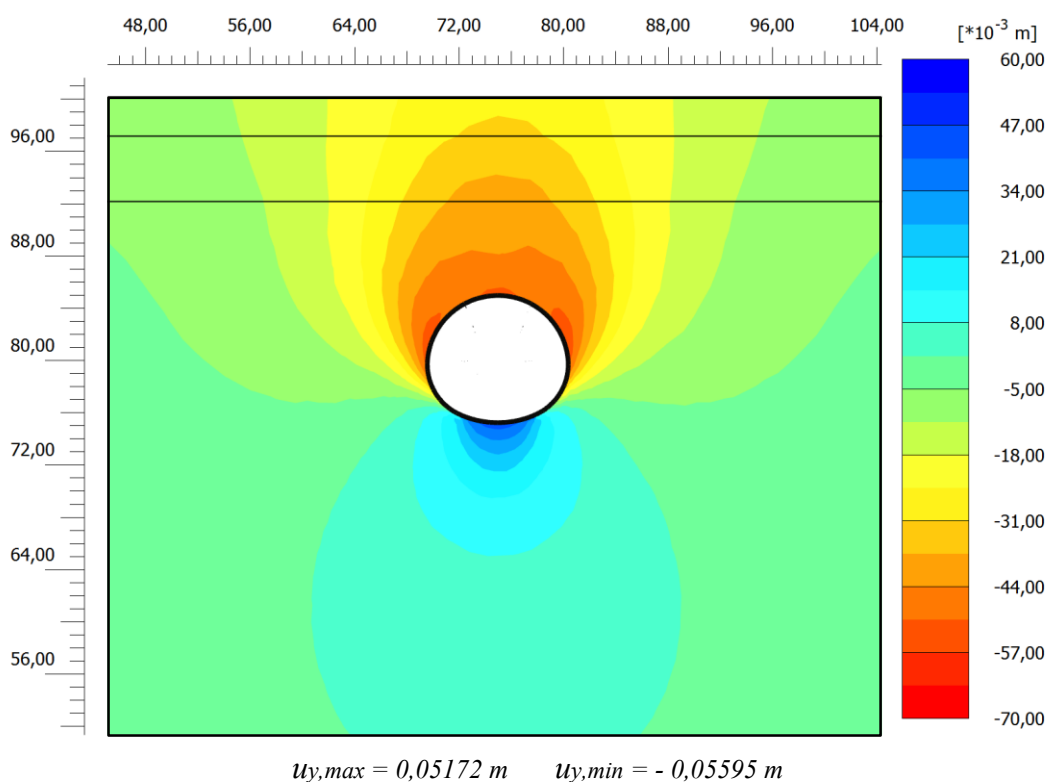


Obr. 27 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem – vertikální čl. s opěr. jádrem

Poklesová kotlina má mírnější průběh s šířkou svého dosahu 120 m. Průběh sedání je mírně nerovnoměrný s největší hodnotou sedání nad vrcholy kaloty I, která činí 2,948 cm. Dále se vzrůstající vzdáleností dochází k postupnému ustalování až na 0,47 cm, v rámci navrženého modelu.

VERTIKÁLNÍ DEFORMACE

Vertikální deformace jsou značné v opěří a přístropí kaloty. Hodnoty deformací dosahují největší hodnoty $u_{y,min} = -0,05595$ m v opěří (vyznačeny červenou barvou). Opačné deformace probíhají v počvě díla, kde jejich hodnota dosahuje hodnoty $u_{y,max} = 0,05172$ m (vyznačeno modrou barvou). Průběh deformací je dán rozfázováním výstavby. Výrazné deformace vznikají zejména při výrubu části opěří I, II, a dále pak při odstranění jádra horniny, před konečným uzavřením výztužného oblouku.

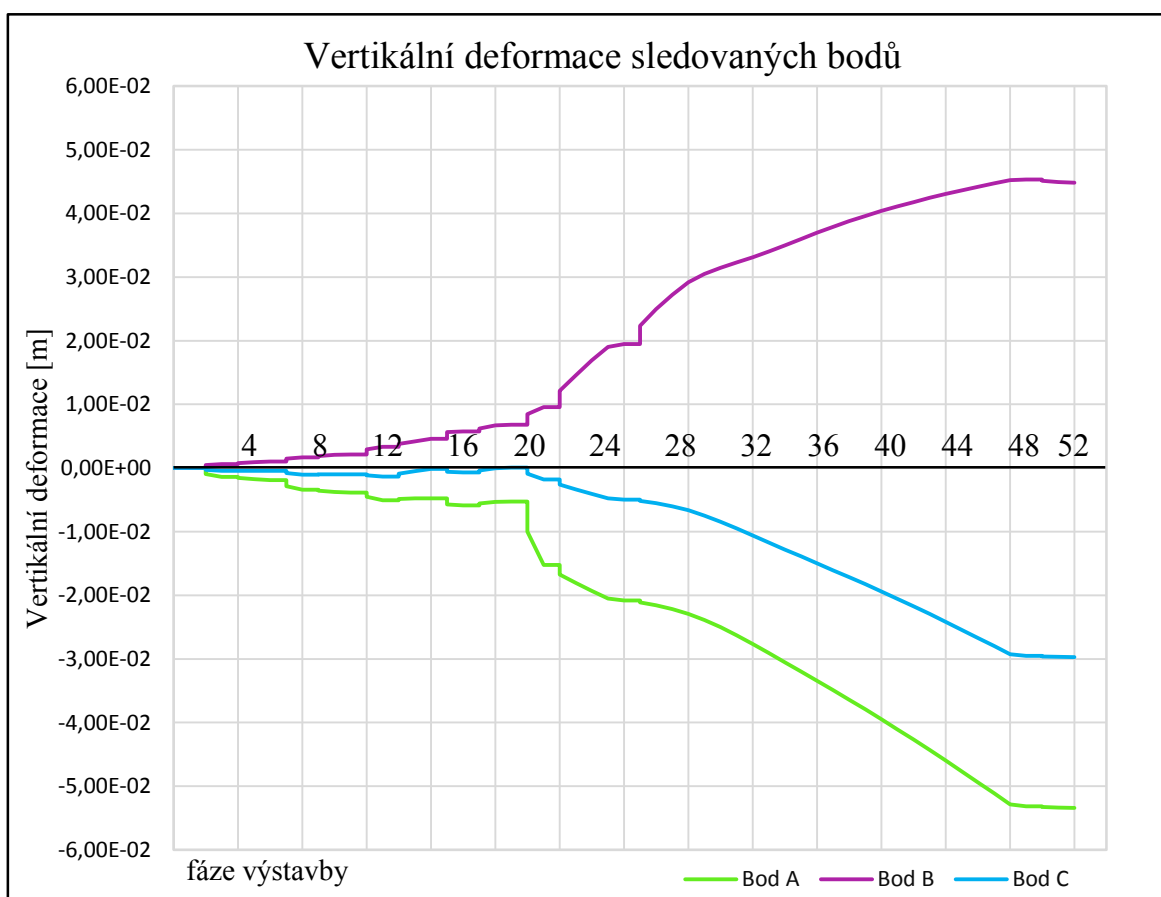


Obr. 28 Vertikální deformace u_y - ražba vertikálním čl. s opěrným jádrem

Vertikální deformace vybraných bodů jsou patrné z grafu 2. Bod A je umístěn v kalotě díla, bod B v počvě a nejdůležitější z bodů C, je umístěn na povrchu území. Přesné rozmístění sledovaných bodů bylo popsáno v kapitole 5.2.

Z grafu 2 je patrný vývoj deformací bodů v jednotlivých krocích výstavby. U toho navrženého typu ražení můžeme opět u bodu C sledovat vzrůst deformací u fází 2,7,12 a 17, které značí ražbu kaloty I, II a opěří I, II. Ve fázích 4,9,14 a 19 dochází k vyztužení těchto úseků a mírnému zmenšení deformací oproti deformacím, kdy byl úsek vyražen. Ve fázi 22 začíná odebrání střední kaloty a prudkému navýšení deformací až do bodu 24, kde byla střední kalota vyztužena. Deformace dále postupně narůstají do fáze 52, ve které se odebralo dno a poté se vyztužilo v kroku 54 až 56.

S ohledem na sledované sedání na povrchu byly nejvýznamnější vertikální deformace zaznamenány ve fázích odtěžování jednotlivých úseků kaloty I, II a opěří I, II a dále ve fázi odebrání střední kaloty. Největší nárůst deformace vzniklé na výrubu ve vrcholu díla (bod A), můžeme pozorovat ve fázi odebrání střední kaloty.

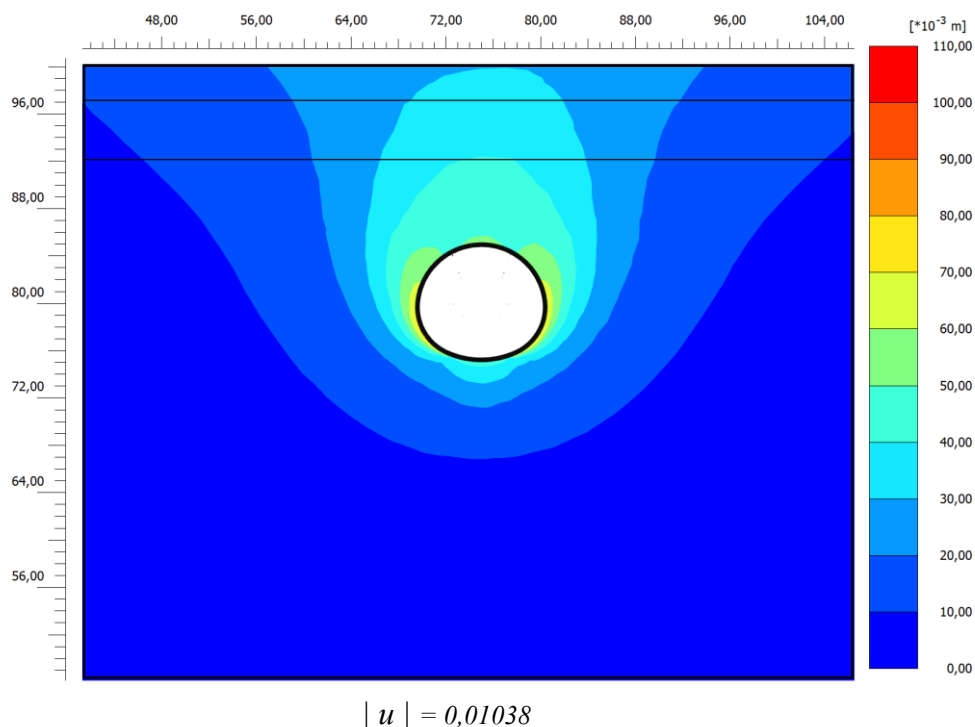


Graf 2 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba vertikálním čl. s opěrným jádrem

TOTÁLNÍ DEFORMACE

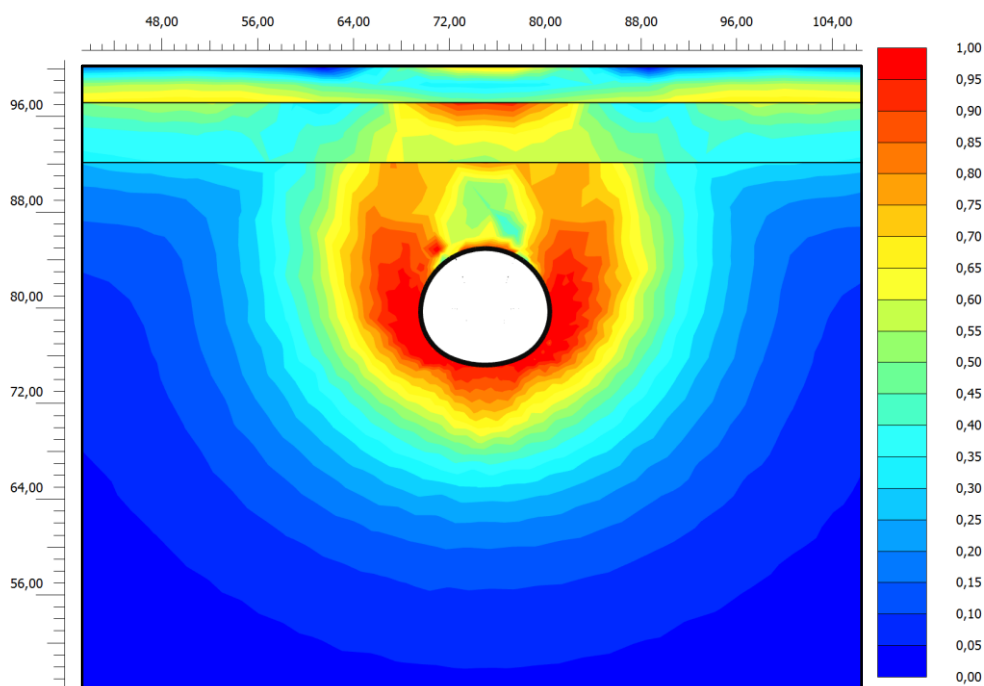
Totální deformace dosahují největších hodnot $u = 0,0104$ m především v bocích kaloty a opěří. Během výstavby došlo k největšímu nárůstu totálních deformací ve fázi vyztužování bočních částí kaloty I, II a opěří I, II. Ve fázi vyztužení kaloty dochází

k mírnému zvětšení deformací, v dalším kroku odebrání a dovyztužení dna, nebyly deformace tak významné.



Obr. 29 Totální deformace u - řezba vertikálním čl. s opěrným jádrem

ČERPÁNÍ PEVNOSTI



$$\tau_{rel,max} = 0,999 \quad \tau_{rel,min} = -0,09267 \cdot 10^{-3}$$

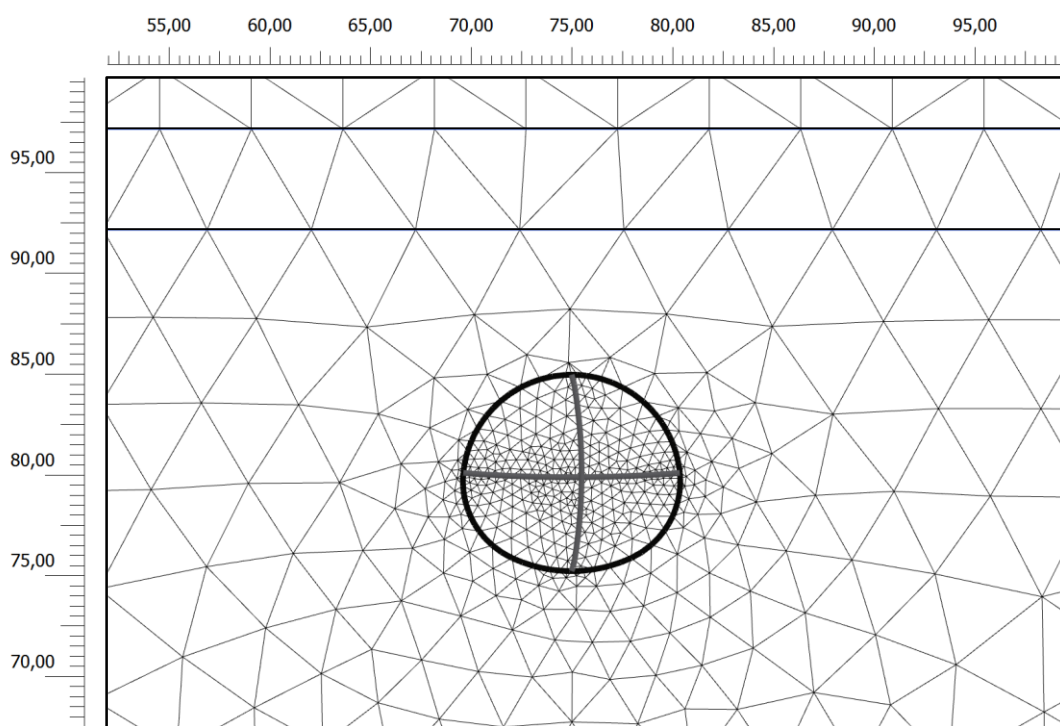
Obr. 30 Čerpání pevnosti – řezba vertikálním čl. s opěrným jádrem

5.3.3 Ražba vertikálním členěním

Ražba způsobem vertikálního členění probíhá postupným pobíráním čelby ve vertikálním směru. Varianta tohoto členění byla popsána v kapitole 4.3. Výrub je rozdělen na kalotu, opěří a dno I, II. Příčné a podélné řezy jsou rozpracovány v příloze 6.

- IMPUT

Vstupní parametry, geometrie a tvorba sítě je stejná jako v předešlých případech.



Obr. 31 Sít' numerického modelu – ražba vertikálním členěním

- CALCULATION

Ve výpočetním modulu byly nadefinovány jednotlivé fáze ražby, které byly detailně rozebrány v kapitole 4.3.

- 1. Fáze: Iniciační fáze**

- horninové prostředí zůstane aktivováno v celém prostoru modelu
- typ výpočtu: K0 procedure

- 2. fáze: Výrub kaloty I**

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$

- zadáno: výrubem kaloty I
- typ výpočtu: plastic

3. fáze: Vyztužení kaloty I

- zadáno: výrubem kaloty I, aktivací primárního ostění v oblasti kaloty I a aktivací pomocného ostění u dna a boku kaloty I

4. fáze: Výrub dna a opěří I

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty I, výrubem dna a opěří I, aktivací primárního a pomocného ostění v oblasti kaloty I, deaktivací p. ostění u dna kaloty I

5. fáze: Vyztužení dna a opěří I

- zadáno: výrubem kaloty I, výrubem dna a opěří I, aktivací primárního ostění v oblasti kaloty, opěří a dna I, aktivace pom. ostění u boků kaloty, opěří a dna I

6. fáze: Výrub kaloty II

- zadáno: výrubem kaloty I a II, výrubem opěří a dna I, aktivací primárního ostění v oblasti kaloty, opěří a dna I, aktivací pom. ostění u boků kaloty ,opěří a dna I.

7. fáze: Výztuž kaloty II

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty I a II, výrubem opěří a dna I, aktivací primárního ostění v oblasti kaloty I a II, aktivace primárního ostění u opěří a dna I, aktivací pom. ostění u boků kaloty ,opěří a dna I.

8. fáze: Výrub opěří a dna II

- zadáno: výrubem kaloty I a II, výrubem opěří a dna I, II aktivací primárního ostění v oblasti kaloty I, II, aktivace primárního ostění opěří a dna I, aktivací pom. ostění u boků kaloty ,opěří a dna I.

9. Fáze: Primární ostění opěří a dna II

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$

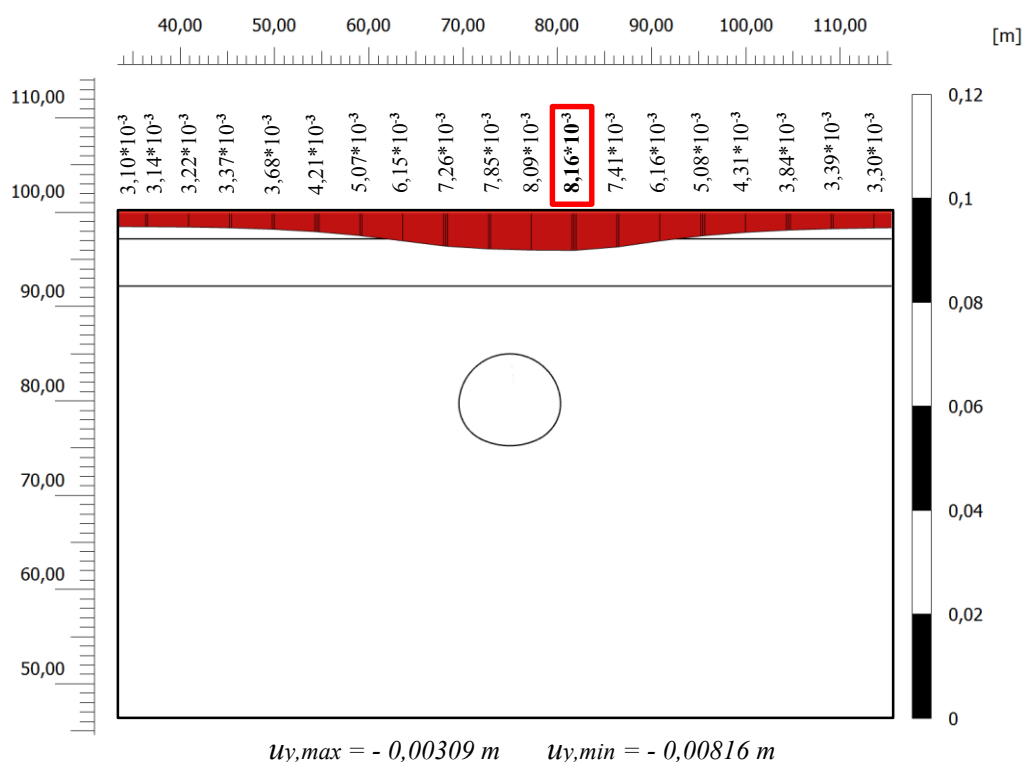
- zadáno: výrubem kaloty I a II, výrubem opěří a dna I, II aktivací primárního ostění v oblasti kaloty I, II, aktivace primárního ostění opěří a dna I, II, deaktivací pom. ostění u boků kaloty ,opěří a dna I

- OUTPUT

Výstupy z modelu zahrnují, pro lepší srovnání s ostatními variantami, vybrané hodnoty sedání, totálních deformací, vertikálních deformací a čerpání pevnosti.

SEDÁNÍ

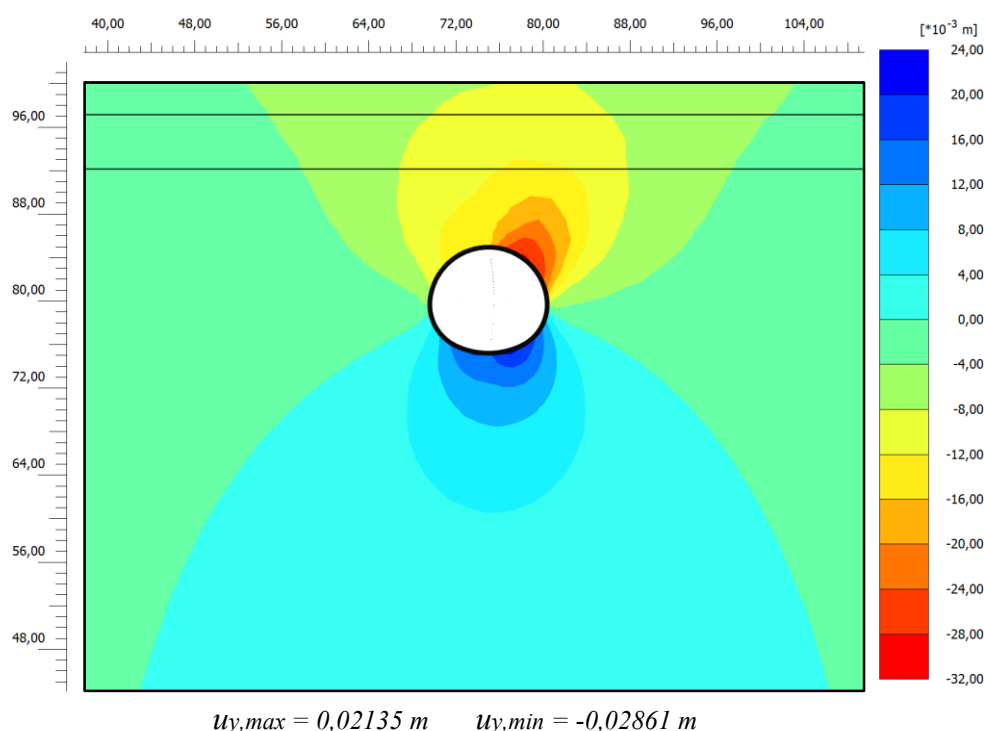
Vývoj sedání a poklesové kotliny, u této varianty ražby, vyšel velmi mírný. Avšak největší hodnoty 0,816 cm, dosáhlo sedání nad pravou částí tunelu. Hodnota sedání se zmenšuje s vzrůstající vzdáleností od tunelu až na 0,3 cm. Šířka poklesové kotliny činí 85 m. Sedání je nerovnoměrné díky navrženému typu členění a to zejména z důvodu ražby pravé části bez pomocného vyztužení dna kaloty II.



Obr. 32 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem - ražba vertikálním členění

VERTIKÁLNÍ DEFORMACE

Vertikální deformace u navrženého typu členění se vyvíjí velmi nerovnoměrně. Největší hodnoty $u_{y,min} = -0,0286$ m, dosahují vertikální deformace nad pravou částí kaloty. V místech dna tunelu, taktéž na pravé straně, můžeme pozorovat zvedání dna s nejvyšší hodnotou $u_{y,max} = 0,0214$ m (obr. 33). Na levé straně raženého díla deformace dosahují polovičních hodnot a to má také značný vliv na vývoj deformací na povrchu území. Na povrchu území dochází taktéž k nerovnoměrným větším poklesům nad pravou stranou díla (obr. 32).

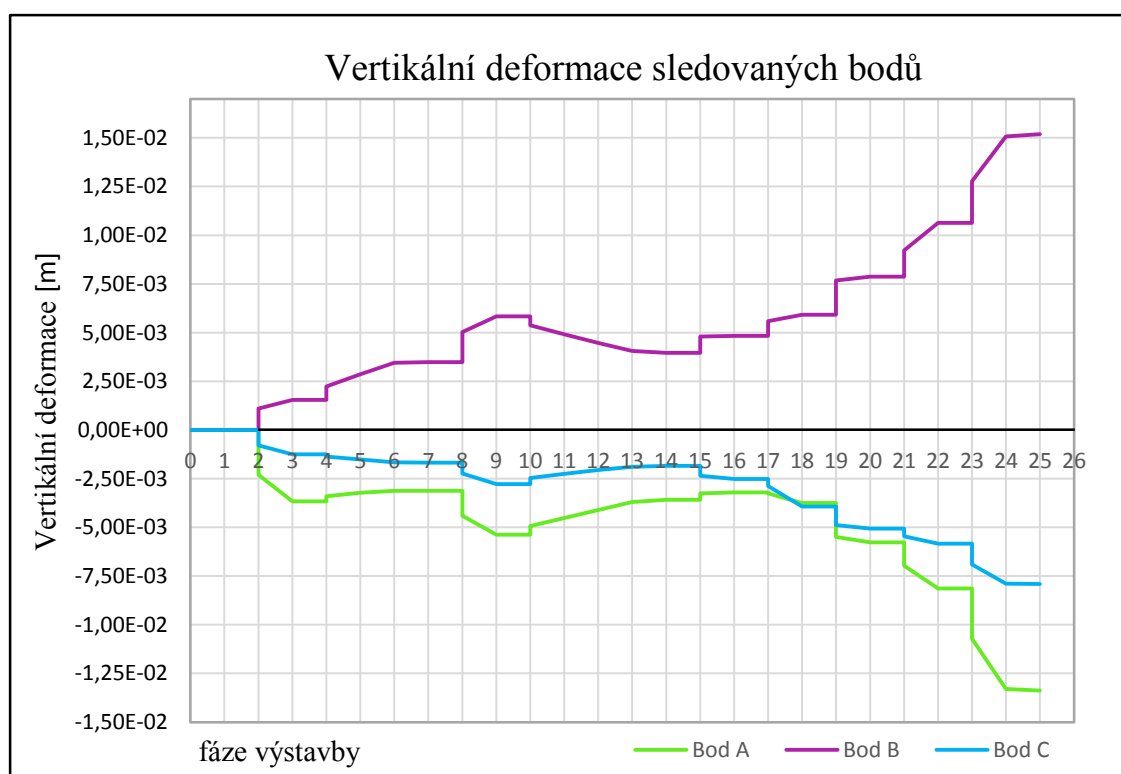


Obr. 33 Vertikální deformace u_y - ražba vertikálním členěním

Vývoj vertikálních deformací v jednotlivých fázích výstavby můžeme sledovat na vybraných bodech, které byly zmíněny v kapitole 5. 2. Vývoj deformací v jednotlivých fázích výstavby je patrný z grafu 3.

Z průběhu vertikálních deformací sledovaného bodu C je patrný prudký nárůst deformací při odtěžení kaloty I ve fázi 2 a také při jejímu vyztužení ve fázi 4. Po té deformace plynule stoupají až k fázi 8, kde dochází k vyražení opěří I, přičemž vzniká opět prudší zvýšení hodnoty deformace. Při vyztužení opěří I dochází v 10 fázi ke zmírnění a postupnému zmenšování deformací. V kroku 15 je odtěžena kalota II a v kroku 17 vyztužena. Ve fázi 19 se odebírá opěří II za současné opory střední výztuže.

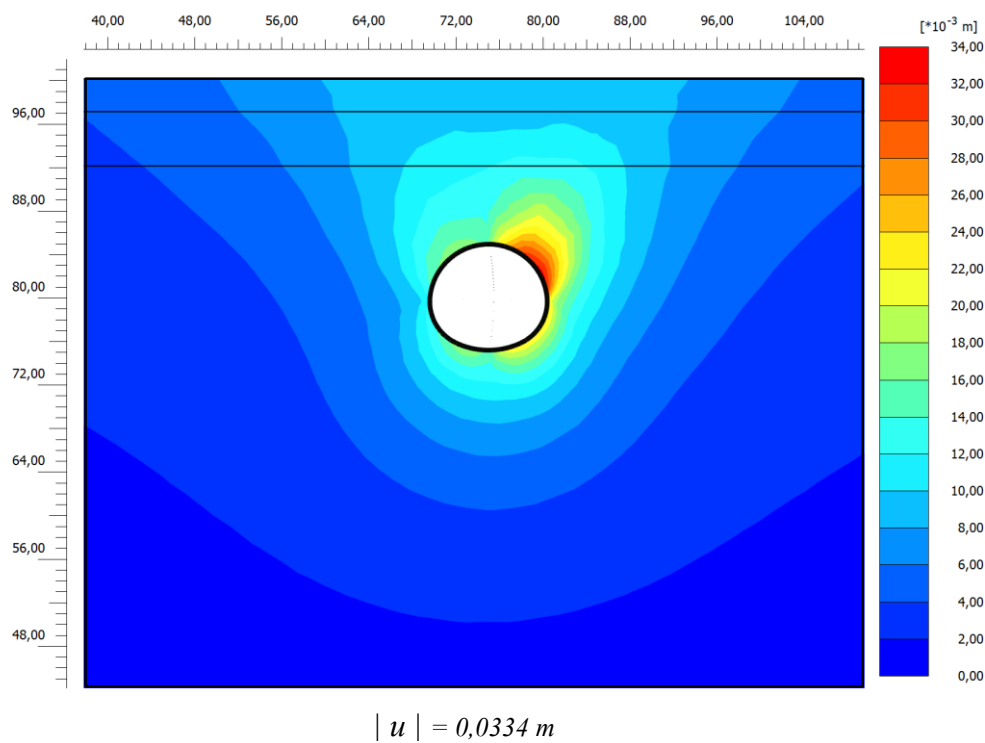
V této fázi výstavby můžeme pozorovat prudší nárůst deformací. Poté dochází k vyztužení opěří II a odstranění pomocné střední výztuže, což je zřetelné na kroku 23, kdy se deformace opět zvyšují až do fáze ukončení 25. Z hlediska deformací na povrchu jsou nejvýznamnější fáze výstavby 19 a 23, kdy probíhalo odebírání opěří II a odstraňování střední opěrné výztuže. Deformace, které proběhly na výrubu, ve vrcholu díla (bod A), ovlivnily zejména fáze 2 a 8, kdy došlo k odebrání kaloty a opěří I a také odebírání opěří II a odstraňování střední opěrné výztuže.



Graf 3 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba vertikálním členěním

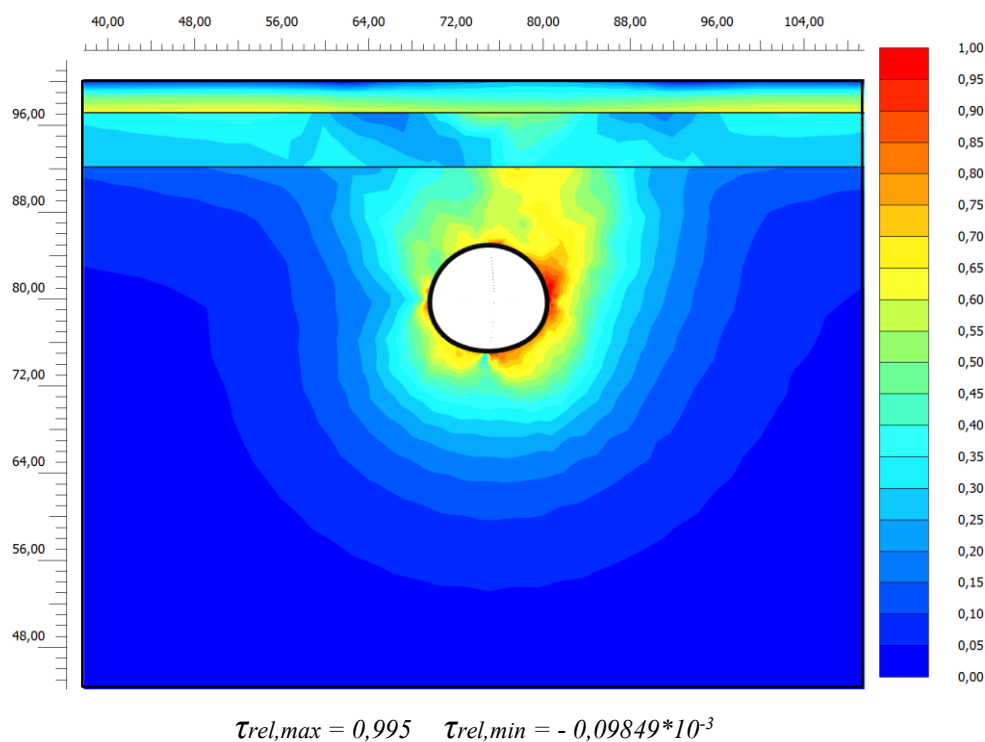
TOTÁLNÍ DEFORMACE

Průběh totálních deformací poukazuje na výrazný vliv ražby v pravé oblasti díla kaloty II, kde hodnota deformací dosahuje až k 0,0334 m. Naopak v levé části díla hodnoty dosahují přibližně poloviny této hodnoty. K výraznému zvětšení deformací v oblasti pravé kaloty II došlo z důvodů aplikované metody ražby, kde byla odebrána kalota II a opěří II bez vyztužení dna kaloty II. Toto nerovnoměrné vyztužení mělo za následek zvýšení napětí v oblasti kaloty II a následné nerovnoměrné deformace celého díla.



Obr. 34 Totální deformace u - ražba vertikálním členěním

ČERPÁNÍ PEVNOSTI



Obr. 35 Čerpání pevnosti – ražba vertikálním členěním

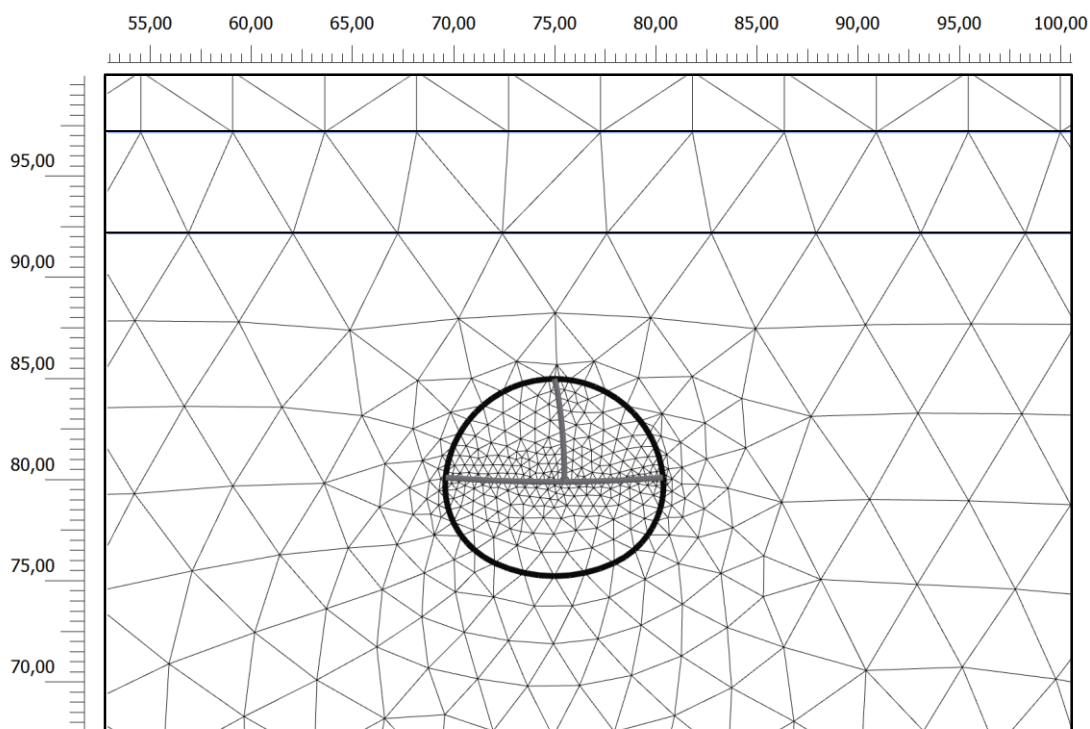
Čerpání pevnosti dochází zejména v pravé oblasti díla, kde můžeme sledovat stoupání až k mezní hodnotě 1. V levé oblasti díla k čerpání pevnosti téměř nedochází. Největšího hodnoty dosahovalo dílo ve fázi výstavby, kdy bylo odebíráno opěří II a současného ponechání střední opěrné výztuže. Nerovnoměrnost je dána zvoleným způsobem ražby.

5.3.4 Ražba kombinovaným členěním

Varianta této ražby vznikla kombinací vertikálního a horizontálního členění a je detailně popsána v kapitole 4.4. Výrub je rozčleněn na kalotu I, II a opěří a dno. Nejprve jsou postupně odebírány kaloty a posléze opěří se dnem. Příčný a podélný řez nalezneme v příloze 8. Dále bude popsána tvorba sítě, výpočet a výsledky modelu.

- IMPUT

Geometrie, zadání materiálových charakteristik i tvorba sítě byla vytvořena jako v předešlých případech.



Obr. 36 Sít' numerického modelu – ražba kombinovaným členěním

- **CALCULATION**

Ve výpočetním modulu byly jako v předchozím případě nadefinovány jednotlivé fáze ražby, které byly detailně rozebrány v kapitole 4.4.

1. fáze: Iniciační fáze

- horninové prostředí zůstane aktivováno v celém prostoru modelu
- typ výpočtu: K0 procedure

2. fáze: Výrub kaloty I

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty I
- typ výpočtu: plastic (všechny následující fáze jsou zadány tímto typem výpočtu)

3. fáze: Vyztužení kaloty I

- zadáno: výrubem kaloty I, aktivací primárního ostění v oblasti kaloty I a aktivací pomocného ostění u dna a boku kaloty I

4. fáze: Výrub kaloty II

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty I, výrubem kaloty II, aktivace primárního ostění kaloty I, aktivace pomocného ostění dna kaloty I, deaktivace bočního pomocného ostění kaloty I

5. fáze: Vyztužení kaloty II

- zadáno: výrubem kaloty I a II, aktivací primárního ostění v oblasti kaloty I a II a aktivací pomocného ostění u dna kaloty I a II

6. fáze: Výrub opěří a dna

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{stage}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty I a II, výrubem opěří a dna, deaktivací pomocného ostění u dna kaloty, aktivací primárního ostění v oblasti kaloty I a II

7. fáze: Primární ostění opěří a dna

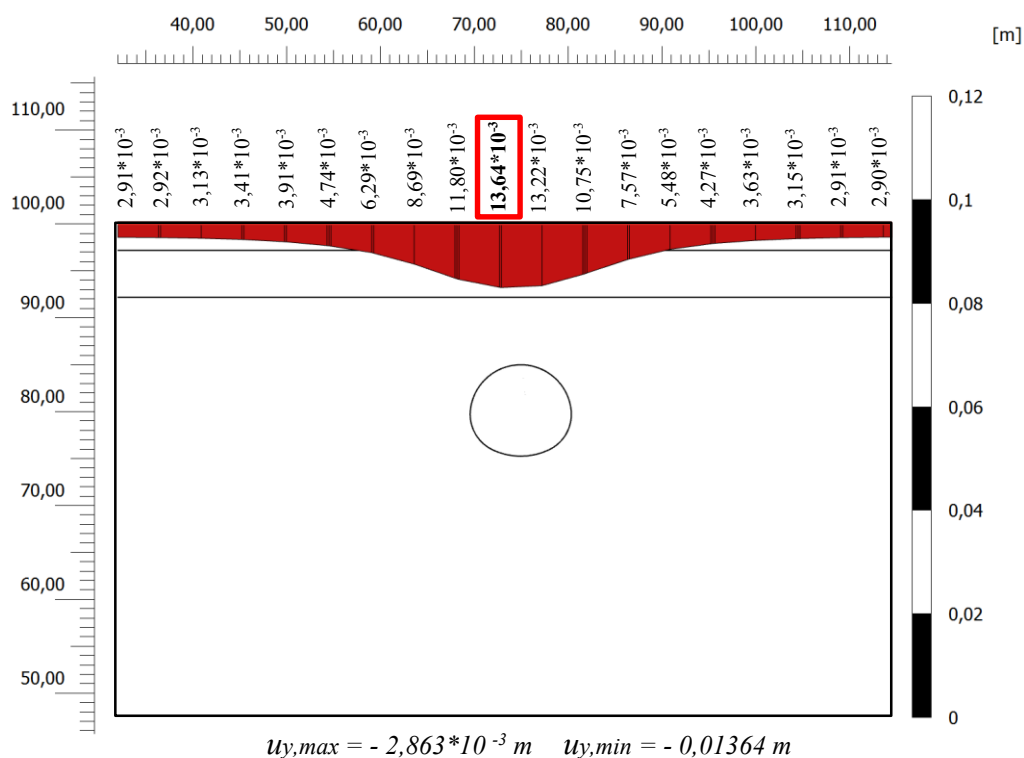
- zadáno: výrubem kaloty I a II, výrubem opěří a dna aktivací primárního ostění v oblasti kaloty I a II, aktivací pomocného ostění u dna kaloty I a II a aktivací primárního ostění opěří a dna.

• OUTPUT

V rámci transparentnosti byly vybrány z výsledků především sedání, vertikální a totální deformace. Pro vybrané fáze 1-6 můžeme sledovat průběhy svislých deformací v příloze 10.

SEDÁNÍ

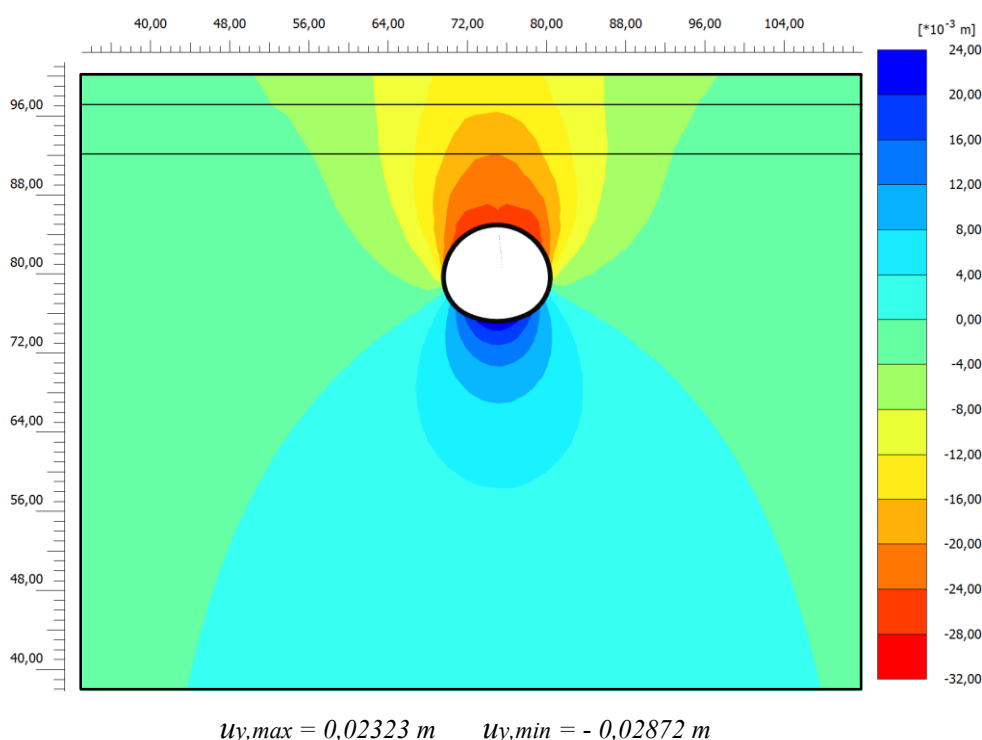
Průběh sedání je patrný z obrázku 37. Sedání dosahuje nejvyšší hodnoty $u_{y,min} = 1,37$ cm nad vrcholem kaloty I a mírnější průběh nastává nad kalotou II. Šířka poklesové kotliny, až do ustálení na hodnotu 0,286 cm, činí 96 m.



Obr. 37 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem - ražba kombinovaným členění

VERTIKÁLNÍ DEFORMACE

Vertikální deformace dosahují největších hodnot v oblasti kaloty. Vlivem rozčlenění kaloty na dvě části (kalotu I a II) vznikají v oblasti přístropí těchto kalot nejvyšší deformace, dosahující hodnoty $u_{y,min} = -0,02872$ m. Můžeme sledovat také deformace počvy díla opačného směru, které nabývají maximálních hodnot $u_{y,max} = 0,02323$ m. Tyto deformace jsou poměrně pravidelně rozloženy ve srovnání s předešlou variantou ražby vertikálním členěním. Vývoj průběhu vertikálních deformací pro jednotlivé fáze se nachází v příloze 9.



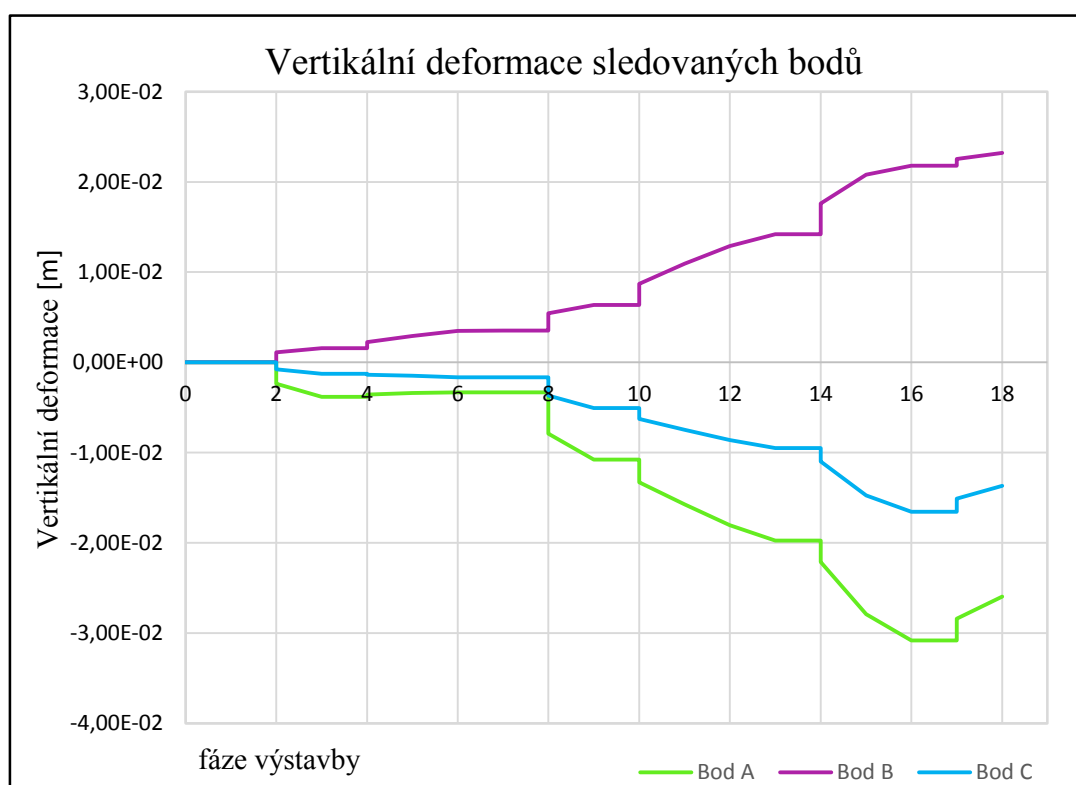
Obr. 38 Vertikální deformace u_y - ražba kombinovaným členěním

Vývoj vertikálních deformací sledovaných bodů v závislosti na probíhajících fázích výstavby znázorňuje graf 4. Body jsou rozmístěny v modelu ve vrcholu díla (bod A), v počvě díla (bod B) a na povrchu území (bod C)

Na průběhu grafu můžeme pozorovat u bodu C větší nárůsty deformací především při vyražení kaloty I (fáze 2) a vyražení kaloty II (fáze 8). Dále dochází k postupnému zvyšování deformací až k bodu 10, kde je vyztužena kalota díla a dochází k prudšímu zvýšení deformací. Plynulým nárůstem deformací se dostáváme k vyražení dna díla (fáze 14), zde opět dochází ke gradaci deformací až do vyztužení (fáze 17).

Z hlediska deformací bodu ležícího na povrchu území, nad vrcholem díla (bod C), se jeví jako nejdůležitější fáze výstavby zejména vyražení obou částí kaloty a jejich vyztužení a také vyražení dna díla.

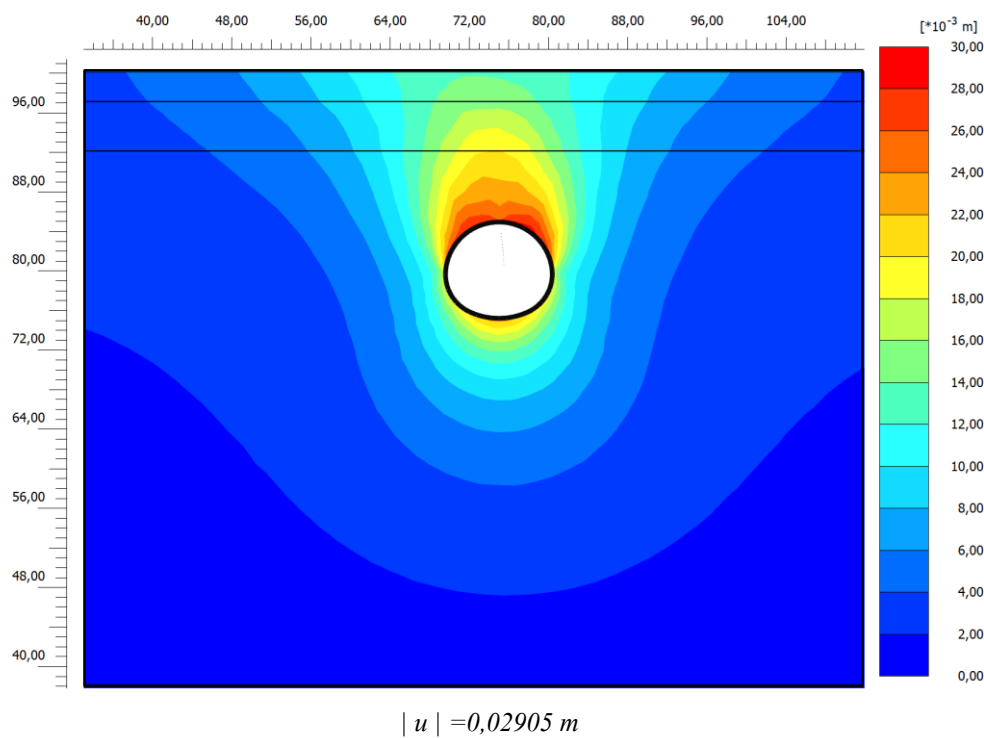
Na deformace na výrubu má nejvýznamnější vliv fáze 8, při které dochází k vyražení kaloty II a nezanedbatelných hodnot dosahuje také při vyztužení kaloty a vyražení dna. Deformace bodu B v počtvě má obdobný průběh jako bod A, avšak s opačným směrem deformací.



Graf 4 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba kombinovaným členěním

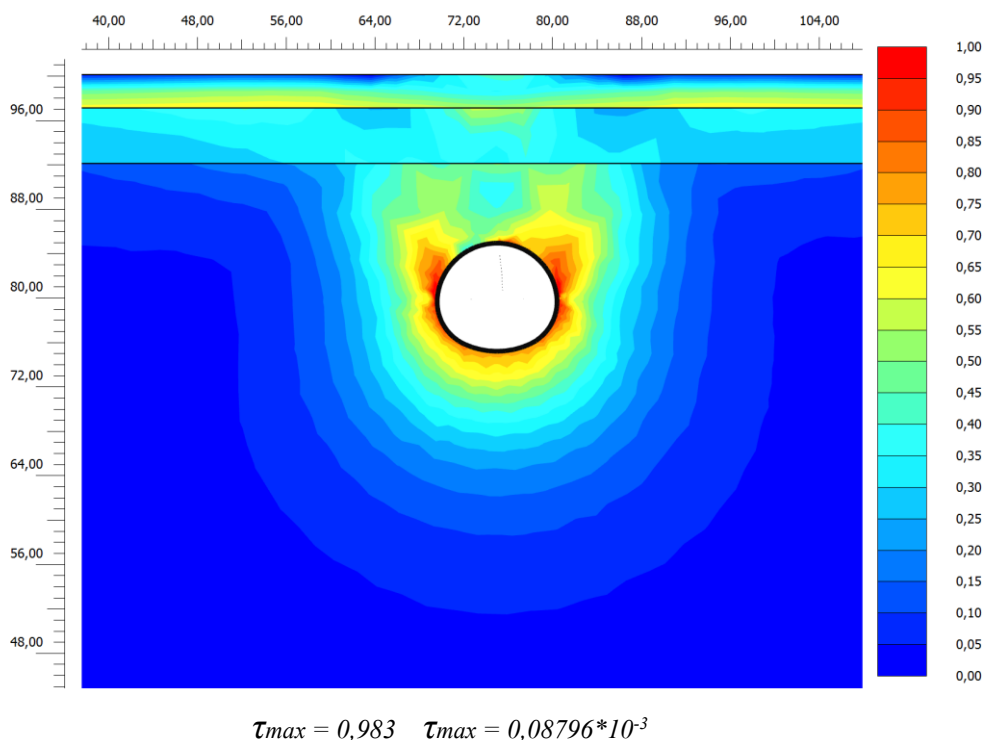
TOTÁLNÍ DEFORMACE

Průběh totálních deformací je znázorněný na obrázku 39. Největších hodnot deformací $u = 0,02905$, nabývá v oblasti přístropí kaloty II. Deformace jsou značné i v oblasti kaloty I. Průběh totálních deformací je dán navrženým postupem ražby, kde k největším deformacím dochází ve fázi odtěžení kalot a dna.



Obr. 39 Totální deformace u - ražba kombinovaným členěním

ČERPÁNÍ PEVNOSTI



Obr. 40 Čerpání pevnosti – ražba kombinovaným členěním

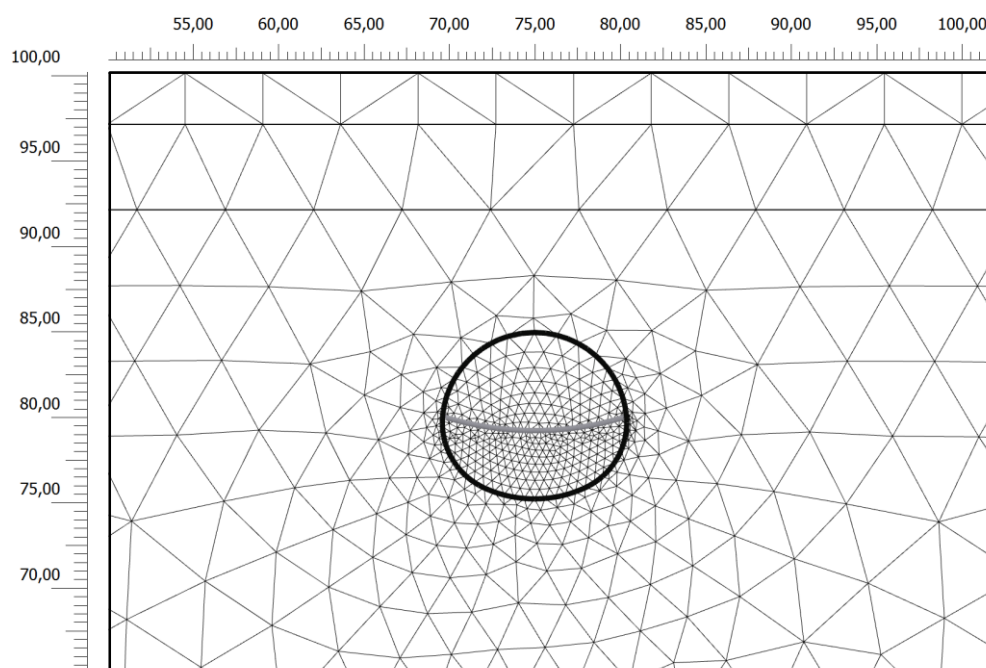
K čerpání pevnosti dochází zejména v oblasti boků díla a mírně i u dna díla. Maximálního čerpání pevnosti, dosahující téměř mezní hodnoty, je dosaženo u boků kaloty (obr 40). Důsledkem daného čerpání pevnosti jsou i výše zmíněné větší deformace výrubu povrchu území v pravé části nad kalotou díla

5.3.5 Ražba horizontálním členěním výrubu

Horizontální členění výrubu patří mezi klasický způsob cyklické ražby. Tento typ ražby je detailně popsána v kapitole 4. 5. Výrub je horizontálně rozčleněn na kalotu, opěří a dno. Ražba a vyztužování probíhá cyklicky od kaloty až po dno tunelu. Příčné a podélné řezy jsou uvedeny v příloze.

- INPUT

Geometrie, zadání materiálových charakteristik i tvorba sítě byla vytvořena jako v předešlých případech.



Obr. 41 Síť numerického modelu – ražba horizontálním členěním

- CALCULATION

1. fáze: Iniciační fáze

- horninové prostředí zůstane aktivováno v celém prostoru modelu
- typ výpočtu: K0 procedure

2. fáze: Výrub kaloty

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{\text{stage}}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty
- typ výpočtu: plastic

3. fáze: Vyztužení kaloty

- zadáno: výrubem kaloty , aktivací primárního ostění v oblasti kaloty a aktivací pomocného ostění u dna kaloty
- typ výpočtu: plastic

4. fáze: Výrub opěří a dna

- před zajištění výrubu proběhlo 30% deformací, v záložce parametrs bylo nastaveno $M_{\text{stage}}=0,3$
- zadáno: výrubem kaloty , výrubem opěří a dna, deaktivací pomocného ostění u dna kaloty
- typ výpočtu: plastic

5. fáze: Vyztužení opěří a dna

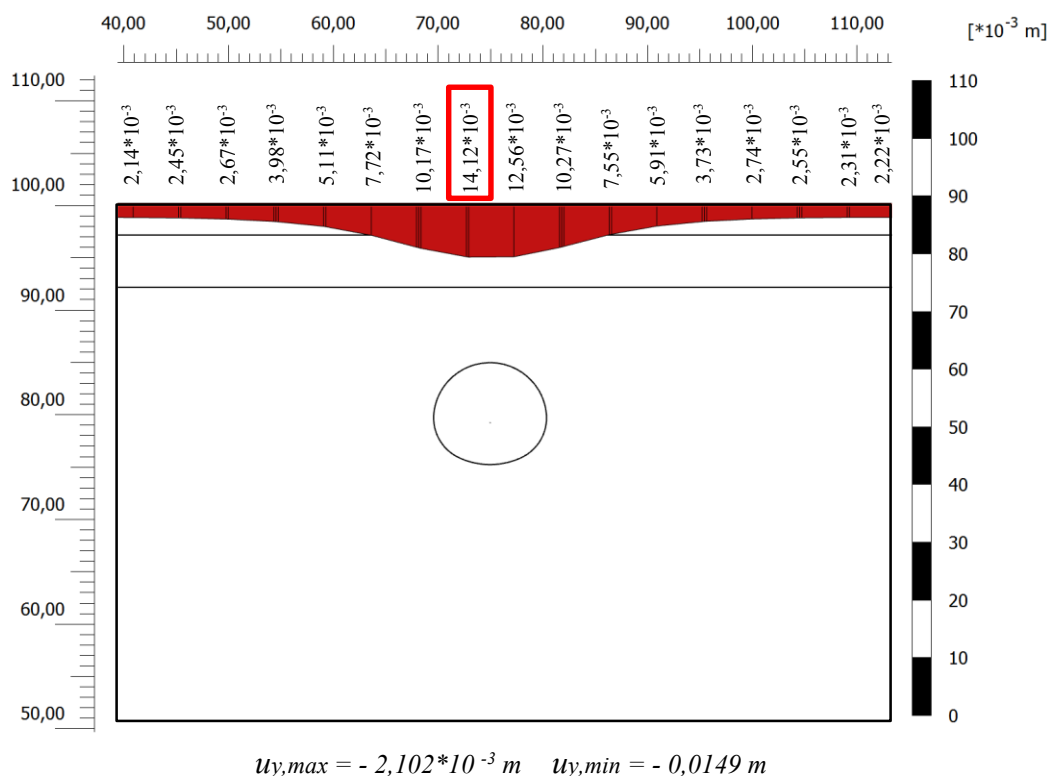
- zadáno: výrubem kaloty, aktivací primárního ostění v oblasti kaloty a aktivací primárního ostění opěří a dna
- typ výpočtu: plastic

• OUTPUT

V rámci transparentnosti byly vybrány z výsledků především sedání, vertikální, totální deformace a čerpání pevnosti.

SEDÁNÍ

Průběh a vývoj poklesové kotliny je zřetelný z obrázku 42. Šířka poklesové kotliny činí přibližně 105 m. Nejvyšší hodnota sedání 1,412 cm, je patrná nad levou částí kaloty v blízkosti vrcholu tunelu. Se stoupající vzdáleností od místa největšího poklesu se hodnota ustaluje až k sednutí o 0,21 m, v rámci navrženého modelu. Sedání povrchu území celkový vývoj poklesové kotliny je nerovnoměrný.



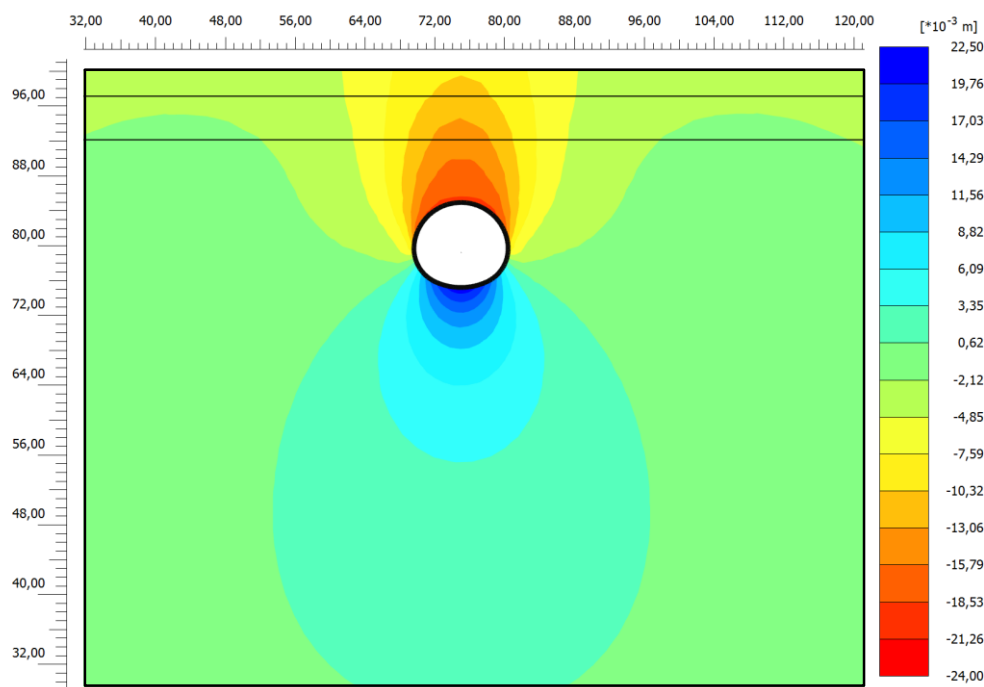
Obr. 42 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem - ražba horizontálním členění

VERTIKÁLNÍ DEFORMACE

Vertikální deformace dosahují nejvyšších hodnot v okolí přístropí díla a počvy díla (obr. 43). Nejvyšší deformace dosahuje dílo u dna, což způsobuje zvedání počvy až na hodnotu $u_{y,min} = - 0,02217 \text{ m}$. Deformace opačného rázu pak můžeme pozorovat u přístropí, kde nabývají hodnot až $u_{y,max} = - 0,01952 \text{ m}$.

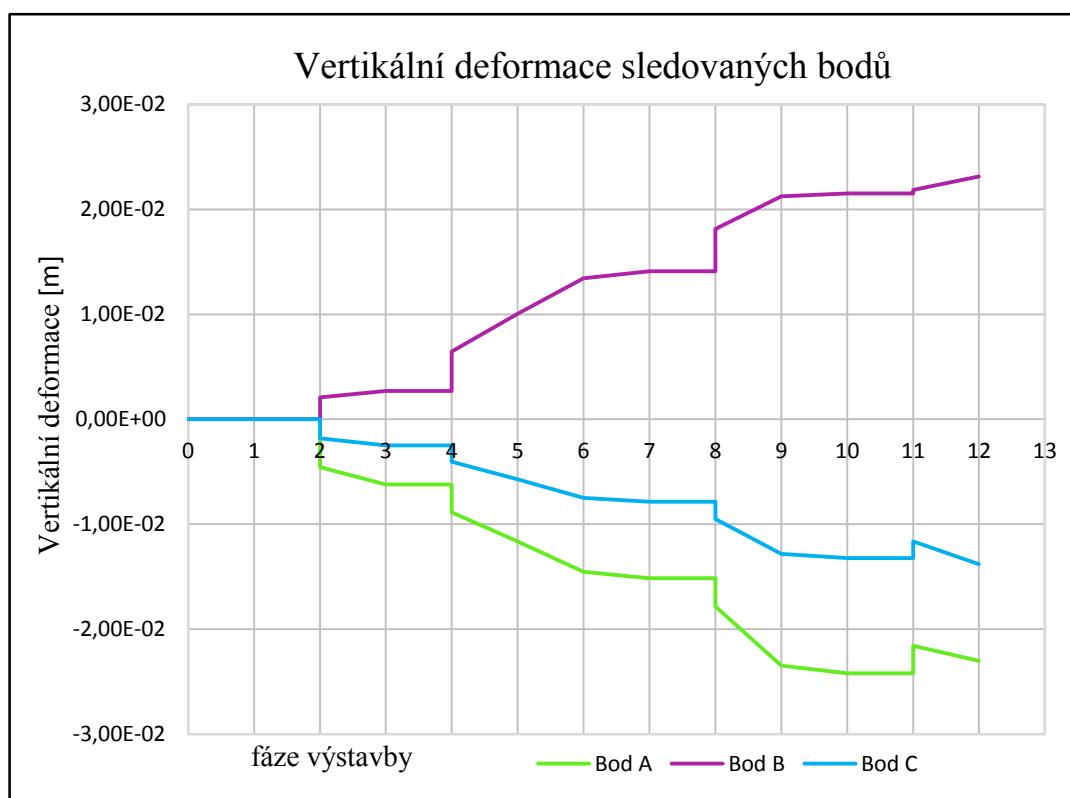
Průběh vertikálních deformací v závislosti na fázi výstavby, pro jednotlivé sledované body, je znázorněno v grafu 5. V modelu nalezneme body: ve vrcholu díla (bod A), v počvě díla (bod B) a na povrchu území (bod C).

Výstavba je započata vyražením kaloty díla (fáze2), kde můžeme pozorovat nárůst deformací. Dále pokračuje prudším zvětšením deformací, způsobeným vyztužením kaloty díla (fáze 4). Dochází k plynulému zvětšování deformací až do odebrání dna (fáze 8), což způsobuje opět velkou gradaci deformací. Postupný nárůst ukončuje fáze 11 a 12, kde je provedeno dovyztužení díla.



$$u_{y,max} = 0,02217 \text{ m} \quad u_{y,min} = -0,01952 \text{ m}$$

Obr. 43 Vertikální deformace u_y - ražba horizontálním členěním

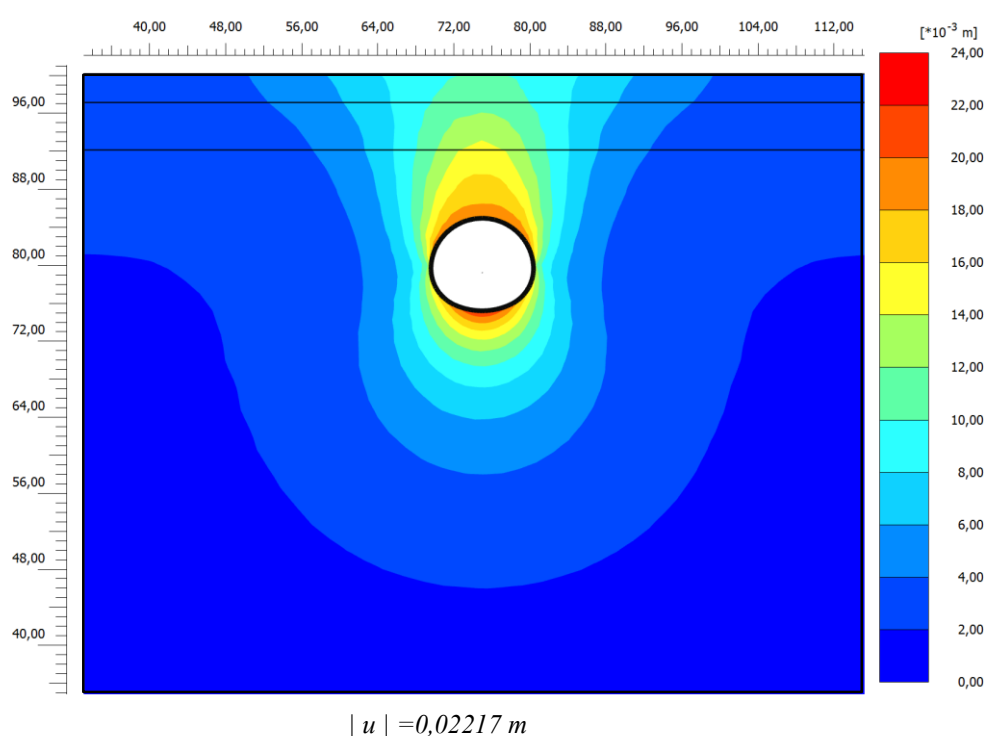


Graf 5 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba horizontálním členěním

Z hlediska deformací na povrchu, které zastupuje bod C, jsou stěžejní fáze výstavby především ty, kdy byla vyztužena kalota a odebráno dno. Zvedání dna dokazuje průběh bodu B.

TOTÁLNÍ DEFORMACE

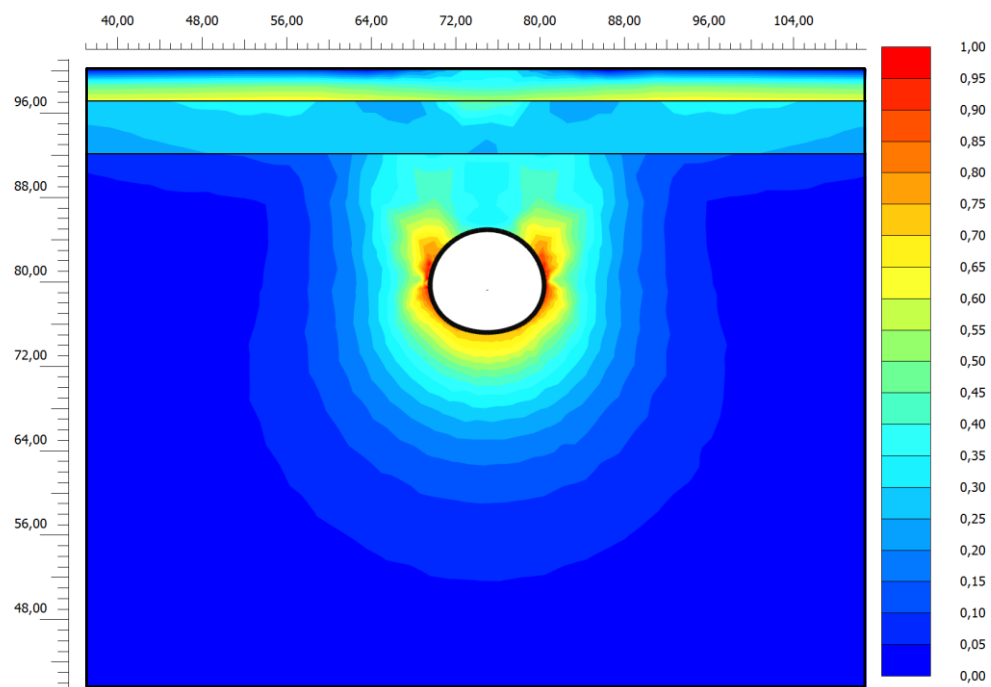
Totální deformace jsou patrné z obrázku 44. Nejvyšší hodnoty $u = 0,02217$ m dosahují deformace u počvy díla. Obdobné hodnoty, jen o něco trochu nižší (okolo 0,020 m), je vidět v přístropí kaloty díla.



Obr. 44 Totální deformace u - rážba horizontálním členěním

ČERPÁNÍ PEVNOSTI

Čerpání pevnosti můžeme pozorovat na obrázku 45. Nejvyšších hodnot dosahuje čerpání pevnosti v bocích díla a u dna, kde tato hodnota dosahuje téměř mezní hodnoty 1 (vyznačeno červenou barvou). Slabého čerpání pevnosti je možno pozorovat i na rozhraní vrstev zemin, kde hodnota dosahuje zhruba poloviny nejvyšší hodnoty. Průběh čerpání je poměrně rovnoměrný na obou stranách díla.



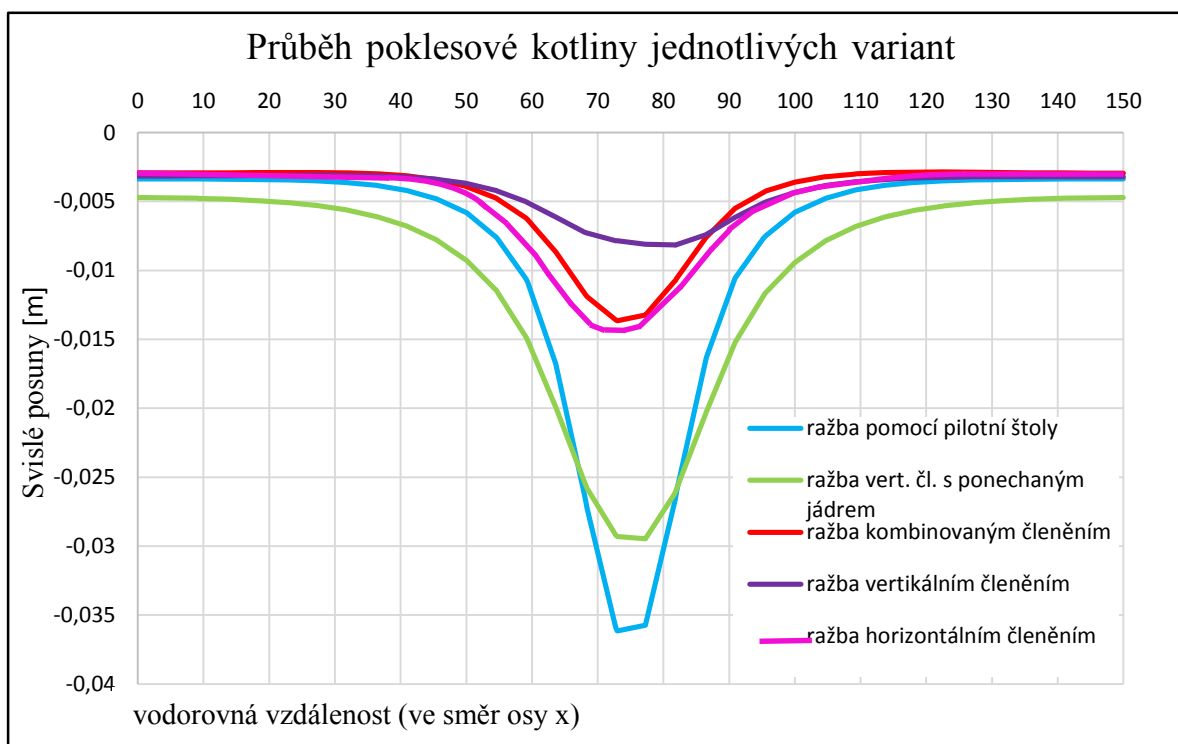
$$\tau_{max} = 0,964 \quad \tau_{max} = 0,07820 \cdot 10^{-3}$$

Obr. 45 Čerpání pevnosti – ražba horizontálním členěním

5.4 Srovnání jednotlivých variant ražeb

Pro všechny navržené varianty ražeb byl proveden 2D numerický model, na kterém byl zkoumán zejména vliv ražby na povrchové deformace území. Tyto deformace byly podrobněji popsány průběhem poklesové kotliny tj. její šířkou a tvarem a hodnotou maximálního sednutí povrchu území. Dále byla věnována pozornost parametrům vertikálních deformací, totálních deformací díla a čerpání pevnosti.

Průběh všech poklesových kotlin navržených variant ražeb ražby můžeme vidět na grafu 6. K nejnižším poklesům dochází u vertikálního členění výrubu díla. Tyto poklesy jsou však velmi nerovnoměrné a rozložené více nad pravou stranou vrcholu díla. Největší povrchové deformace byly zaznamenány u ražby pomocí pilotní štoly, kde jsou poklesy vyšší, avšak šířka této kotliny je užší ve srovnání s ostatními variantami. Jednoznačně nejširší poklesovou kotlinu vytvoříme, pokud využijeme ražby vertikálním členěním s ponechaným jádrem horniny. Nejpriznivější poklesovou kotlinu, co do tvaru, šířky i hloubky způsobila ražba kombinovaným členěním.



Graf 6 Srovnání průběhu poklesových kotlin jednotlivých variant ražeb

Na základě vyhotovených modelů pro jednotlivé varianty ražby bylo provedeno srovnání podle vybraných parametrů (tab. 4).

varianta ražby	šířka poklesové kotliny h [m]	maximální sednutí s [m]	max. vertikální deformace u_y [m]	max. totální deformace u [m]	čerpání pevnosti τ_{rel} [-]
ražba pilotní štolou	98	0,03615	0,06231	0,07500	0,989
ražba vertikálním čl. s jádrem	120	0,02948	0,05595	0,01038	0,999
ražba vertikálním členěním	85	0,00816	0,02861	0,03340	0,995
ražba kombinovaným čl.	96	0,01364	0,02872	0,02905	0,983
ražba horizontálním členěním	105	0,01412	0,02217	0,02217	0,964

Tab. 4 Srovnání vybraných parametrů jednotlivých variant ražeb

Největších poklesů z navrhovaných variant dosáhla ražba pilotní štolou, zde poklesy dosáhly 3,615 cm. Šířka poklesové kotliny však byla menší, v porovnání s ražbou vertikálním členěním s ponechaným jádrem, která měla při podobných poklesech kotlinu širší. Poměrně velké byly i vertikální a totální deformace.

Ražby vertikálním členěním výrubu s ponechaným jádrem horniny vytváří nejširší poklesovou kotlinu ze všech navržených variant. Hodnota v nejnižším bodě poklesové kotliny činí 2,948 cm.

Varianta ražby vertikálním členěním dosáhla zdánlivě nejlepších výsledků. Šířka poklesové kotliny činila 85 m a maximální hodnota sedání dosahovala pouhých 0,816 cm. I přesto tento způsob ražby není vhodný z hlediska nerovnoměrných deformací, které byly zaznamenány v průběhu všech fází výstavby. To mělo vliv na nerovnoměrné deformace na povrchu.

Ražba horizontálním členěním je uvedena v práci pro srovnání, jako zástupce klasické ražby. Přesto nedosáhla nejhorších výsledků ani v hodnotách nejvyššího sednutí ani v dalších parametrech.

Jako nejvhodnější varianta pro výstavbu v těchto podmínkách byla vybrána, podle výsledků dosažených numerickým modelováním, ražba kombinovaným členěním výrubu. Šířka poklesové kotliny měří 96 m a její maximální hodnota je 1,364 cm. Průběh kotliny je téměř symetrický. Tato varianta bude vybrána pro další zpracování numerickým modelováním v 3D.

6 Matematický model odstavného tunelu v 3D

Ražba kombinovaným členěním byla, na základě modelů zpracovaných v programu Plaxis 2D, vybrána jako nejvhodnější pro realizaci v daných podmínkách. Pro přesnější zkoumání poklesové kotliny a jejího vývoje byla vybraná varianta ražby zpracována 3D modelem v programu Midas GTS.

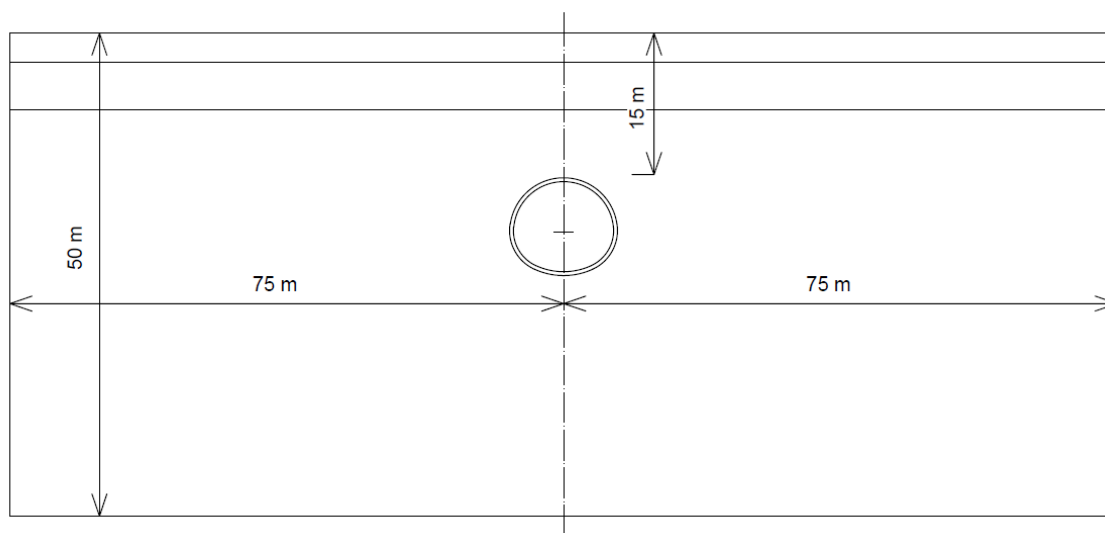
Program Midas GTS využívá metody konečných prvků k řešení širokého spektra geotechnických problémů. Metoda konečných prvků již byla zmíněna v kapitole 5.1.

6.1 Tvorba modelu

Model byl vytvořen importem geometrie modelu a jejím následným nasítováním, zadáním materiálových charakteristik, zadáním okrajových podmínek a vytvořením jednotlivých fází výpočtu.

6.1.1 Geometrie modelu

Geometrie modelu byla vytvořena importem souboru DXF z programu Autocad, který byl totožný s použitým souborem k tvorbě modelu v 2D. Rozměry modelu po importování vhodně upraveny (obr. 46). Pro zjednodušení celkového modelu a jeho výpočtu nebyly zadány navrhované předstihové stabilizační opatření, které byly u navrhované varianty popsány. Vymodelován byl přímý úsek v délce třiceti metrů.



Obr. 46 Geometrie numerického modelu 3D

6.1.2 Zadání materiálových charakteristik

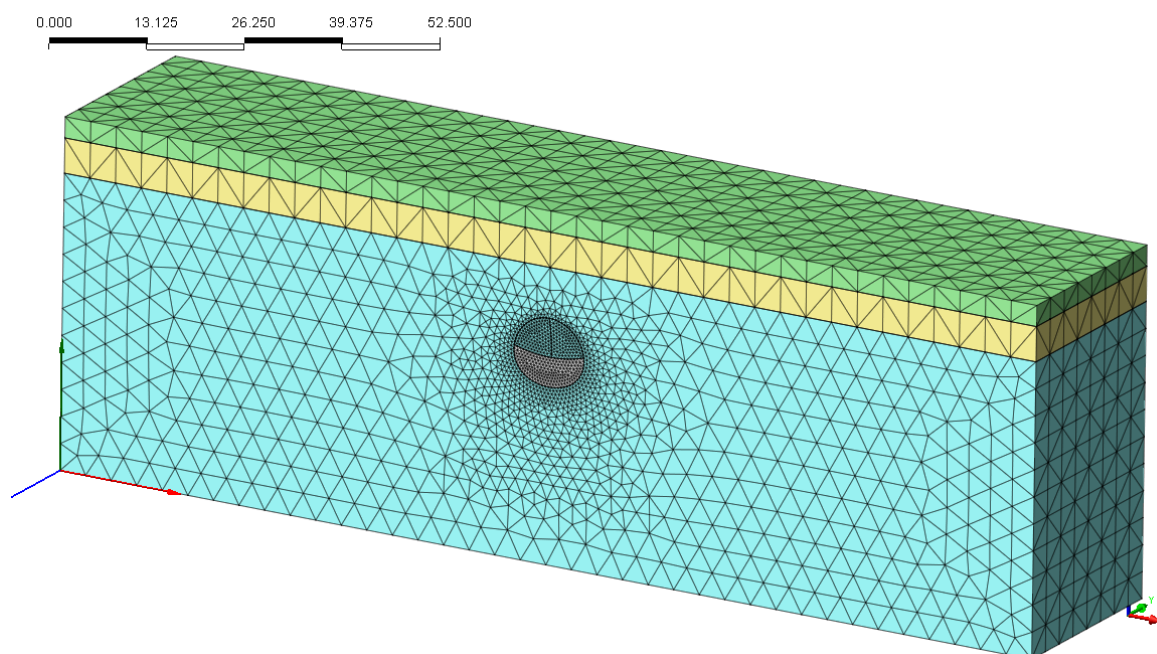
Zadávání materiálových charakteristik probíhalo pomocí funkce *structural material*. Při zadávání materiálových charakteristik nemohl být u jílu se střední a nízkou plasticitou použit konstituční model Hardening soil z důvodu jeho absence v tomto programu. Z tohoto důvodu byl pro všechny typy zemin použit konstituční model Mohr Coulomb. Vstupní charakteristiky pro model Mohr Coulomb a Hardening soil se liší, proto musely být parametry těchto zemin náležitě upraveny pro srovnatelnost výsledků. Upravené parametry zemin jsou uvedeny v tabulce 5. Parametry ostění byly použity stejné, jako jsou uvedeny v kapitole 5.2 v tabulce 3.

<i>Parametry zemin</i>	<i>Kvarterní pokryv</i>	<i>Jíl s nízkou plasticitou</i>	<i>Jíl se střední plasticitou</i>
$\gamma = \gamma_{sat}$ [kN/m ³]	20	20	20
E_{def} [MPa]	7,5	5,4	7,42
E_{oed} [MPa]	-	6	10
ν [-]	0,3	0,2	0,3
c [kPa]	10	20	20
ϕ [°]	20	23	23
K_0 [-]	1	0,85	0,85

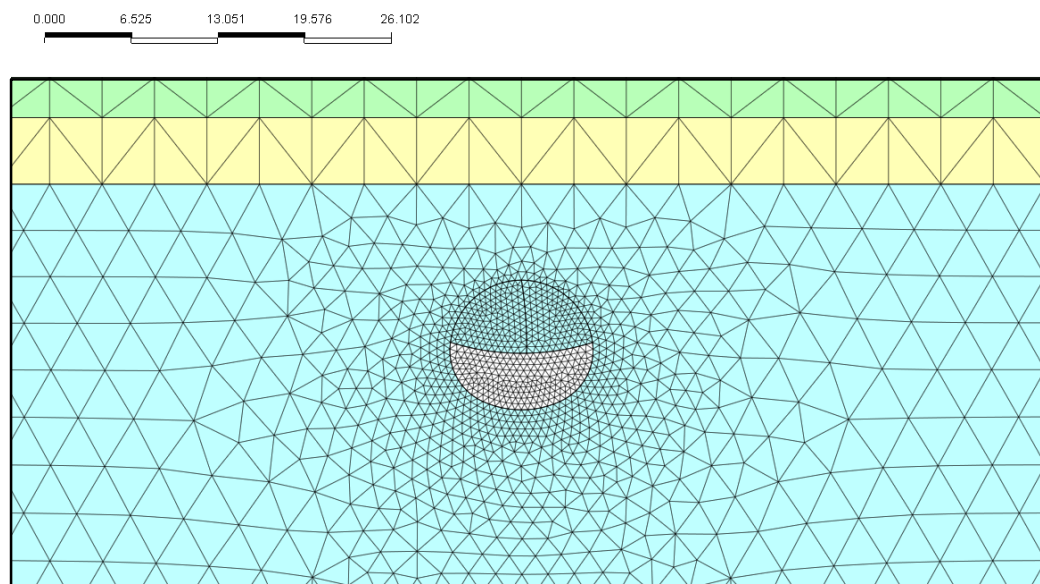
Tab. 5 Upravené materiálové charakteristiky zemin (konstituční model Mohr Coulomb)

6.1.3 Sít' numerického modelu

Po zadání geometrických a materiálových charakteristik modelu může být nagenеровána sít' konečných prvků. Sít' byla vytvořena jak pro jednotlivé vrstvy zeminy, tak i pro jednotlivé části tunelu a jeho ostění. Sít' byla vytvořena pomocí funkce *auto mesh* trojrozměrnými trojúhelníkovými prvky.



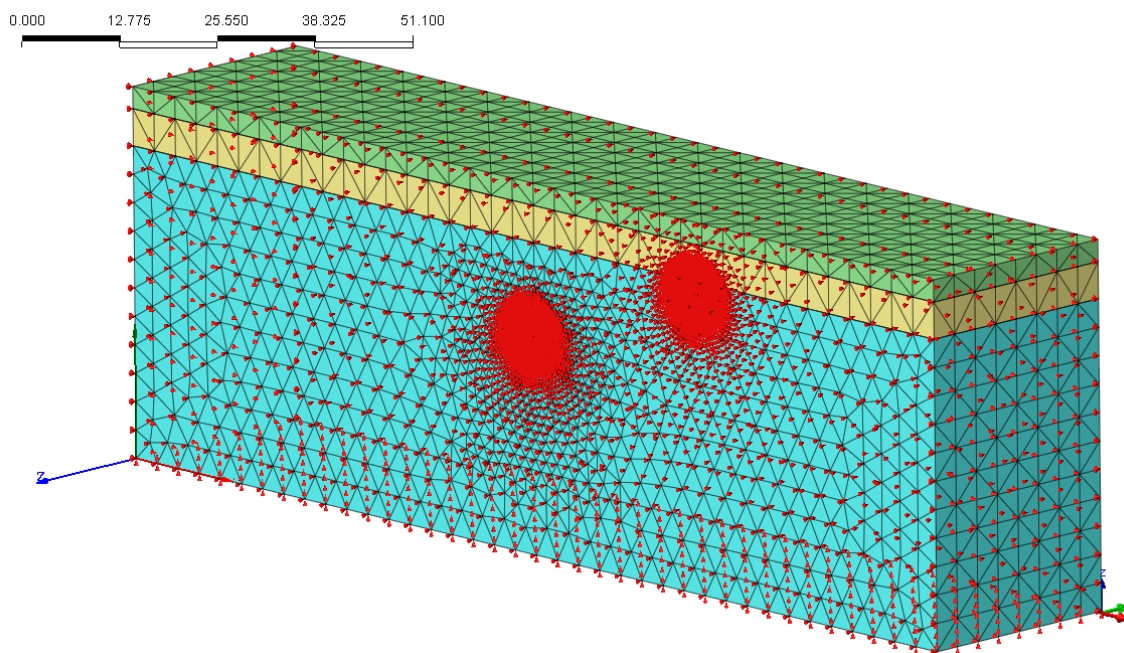
Obr. 47 Sít' numerického modelu 3D



Obr. 48 Detail sítě numerického modelu 3D

6.1.4 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly nadefinovány funkcí *boundary conditions*, jako tzv. tuhá vana.

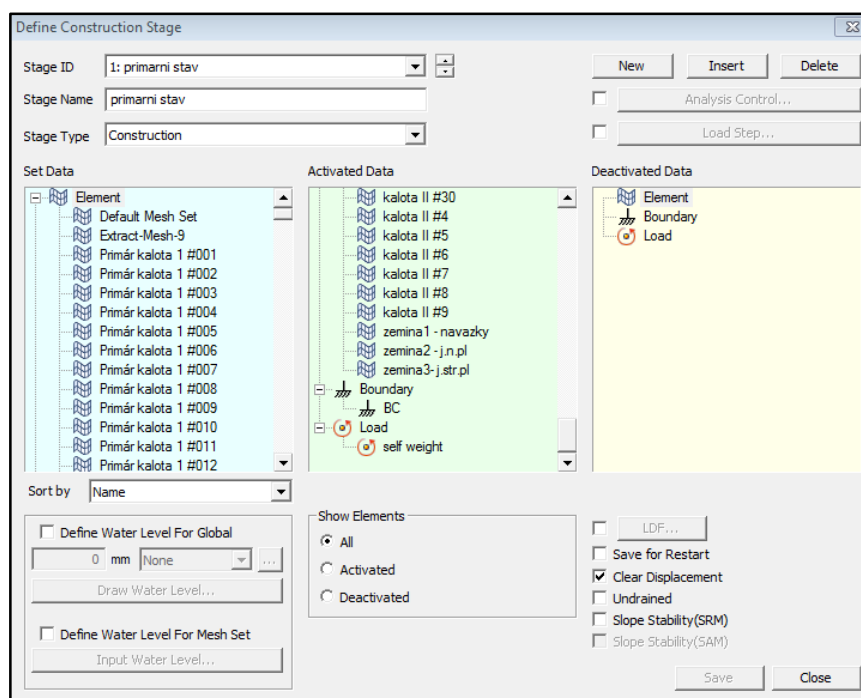


Obr. 49 Okrajové podmínky numerického modelu 3D

6.2 Fáze výpočtu

Program umožňuje realistickou simulaci jednotlivých fází výstavby. Fáze výstavby se krok po kroku zadávají do programu přes funkci *define construction stage*, která umožňuje přesnou aktivaci a deaktivaci ražených a vyztužovaných prvků (obr. 50). Správné přiřazení jednotlivých částí do sekcí aktiveted nebo deactivated můžeme pozorovat na 3D modelu, se zapnutím funkce *show element*.

Model byl rozfázován s ohledem na vertikální posuny na povrchu. Model má délku 30 m a jednotlivé zabírky jsou po 1m. Bylo namodelováno 100 fází pro sledování rozvoje poklesové kotliny. Výstavba započala ražbou kaloty I (levá část) v předstihu před kalotou II o pět zabírek. Po vyražení pěti zabírek kaloty I se začala razit i kalota II, vždy střídavě s kalotou I. Dno se započalo razit, s odstupem dalších pěti zabírek od kaloty II (deseti zabírek od kaloty I), opět střídavě s kalotami. Posléze už bylo ražení cyklické v pořadí: výrub a výztuž kalota I, výrub a výztuž kalota II, výrub a výztuž dno tunelu. Jednotlivé zabírky byly realizovány po 1 metru. V každé fázi výrubu byly zadány proběhlé 30% deformace před zajištěním.

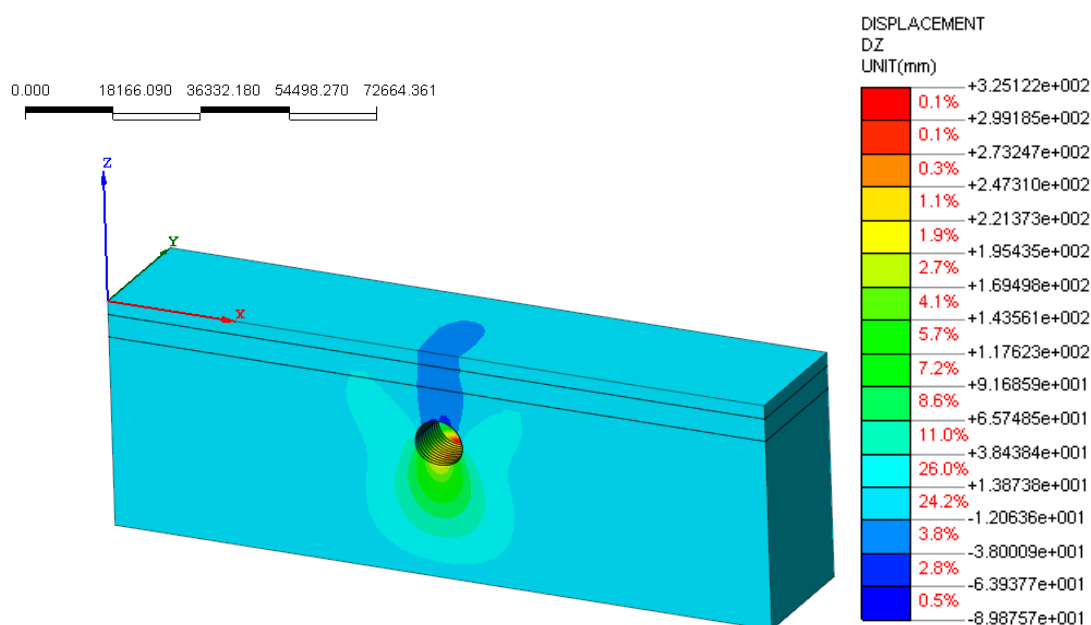


Obr. 50 Ukázka zadávání fází výpočtu, primární stav

6.3 Výsledky výpočtu modelu

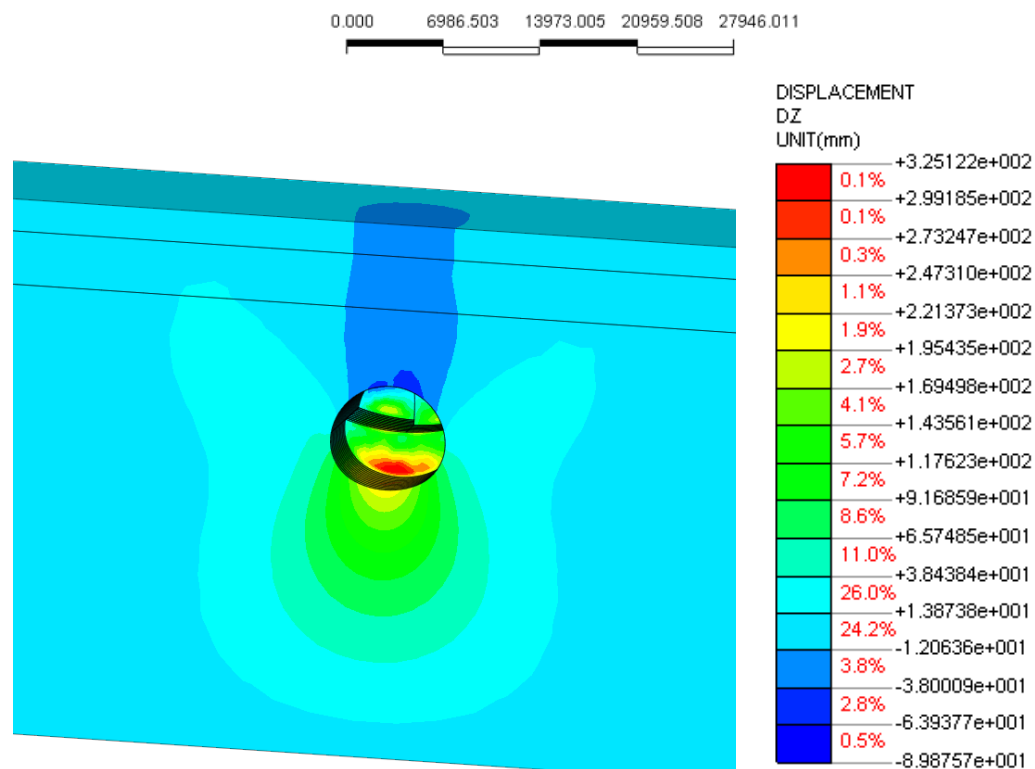
Po proběhnutí výpočtu byly vybrány výsledky pomocí modulu analysis results. Na modelu byly sledovány především vertikální posuny a vývoj poklesové kotelny

VERTIKÁLNÍ POSUNY

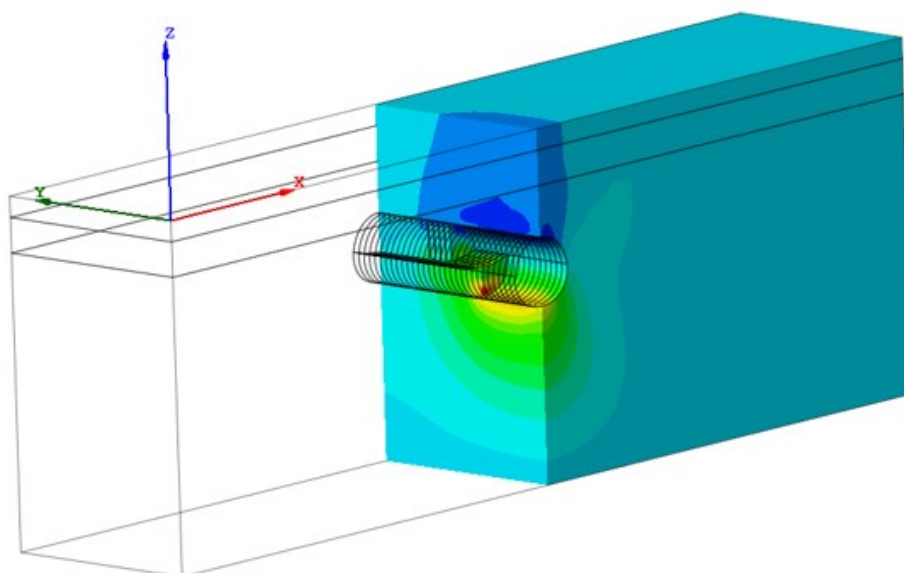


Obr. 51 Vertikální posuny (axonometrický pohled)

Vertikální posuny raženého díla můžeme pozorovat na obrázcích 50,51 a 52. Tmavě modrou barvou jsou označeny místa, kde dochází ke svislým posunům (záporným). Červenou barvou jsou označena místa, kde dochází ke zvedání, které je v modelu patrné především u dna díla.



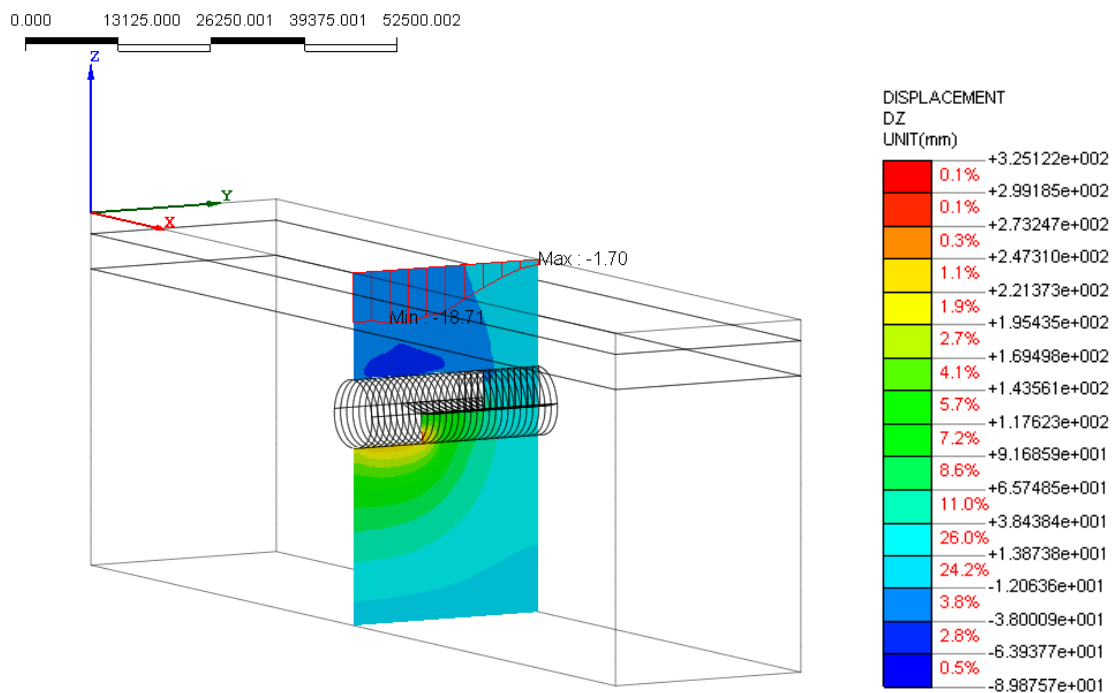
Obr. 52 Detail vertikálních posunů



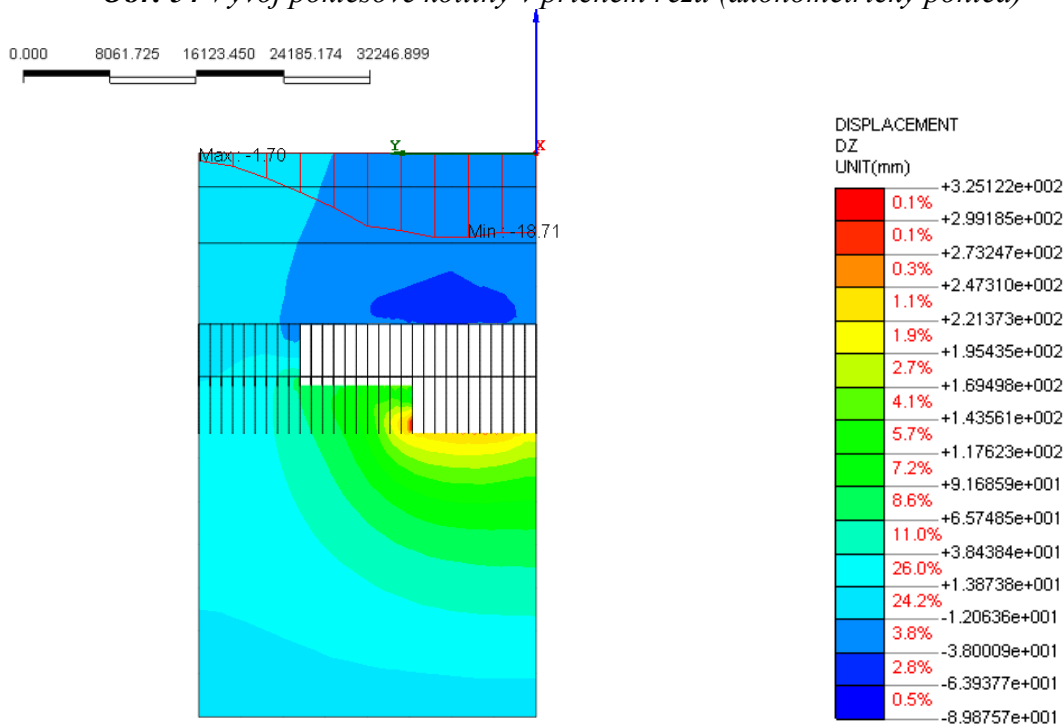
Obr. 53 Vertikální posuny v řezu procházející osou tunelu

VÝVOJ POKLESOVÉ KOTLINY

Vývoj poklesové kotliny v podélném řezu nad vrcholem díla můžeme pozorovat na jednotlivých obrázcích. Nejvyšší hodnoty sedání dosahují 18,71 mm, což je patrné z pohledu axonometrického (obr. 54) a z bočního pohledu na podélný řez tj. kolmém na osu x (obr. 55).

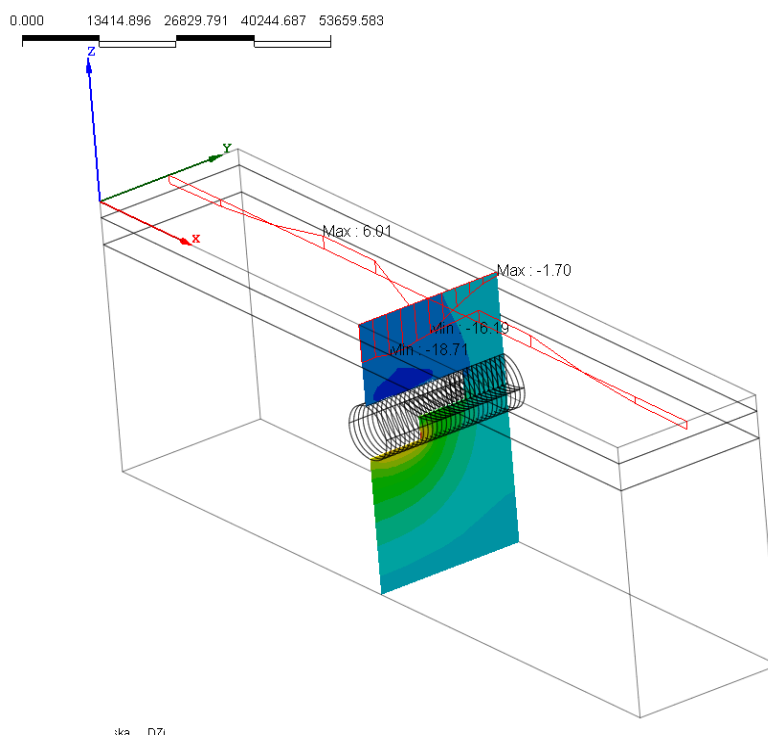


Obr. 54 Vývoj poklesové kotliny v příčném řezu (axonometrický pohled)

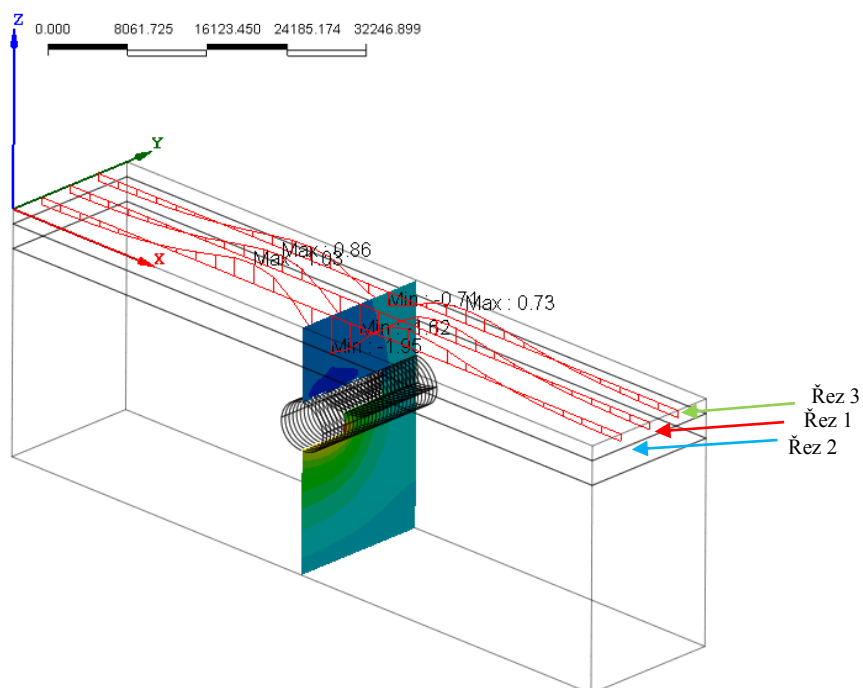


Obr. 55 Vývoj poklesové kotliny v podélném řezu (boční pohled)

Vývoj poklesové kotliny v axonometrickém pohledu je viditelný na obrázku 56. Zde byly vykresleny dva řezy v příčném a podélném směru včetně jejich maximálních hodnot. Legenda svislých posunů, vztahující se k obrázku 56 a 57, je stejná jako u obrázku 55.

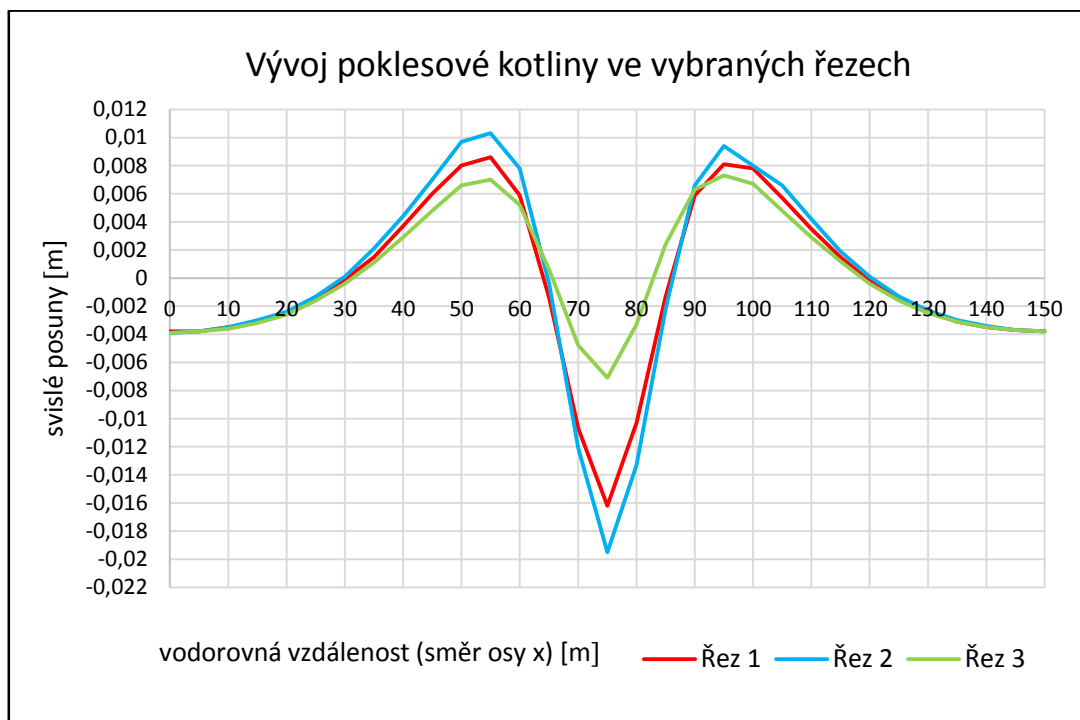


Obr. 56 Vývoj poklesové kotliny ve dvou na sebe kolmých řezech

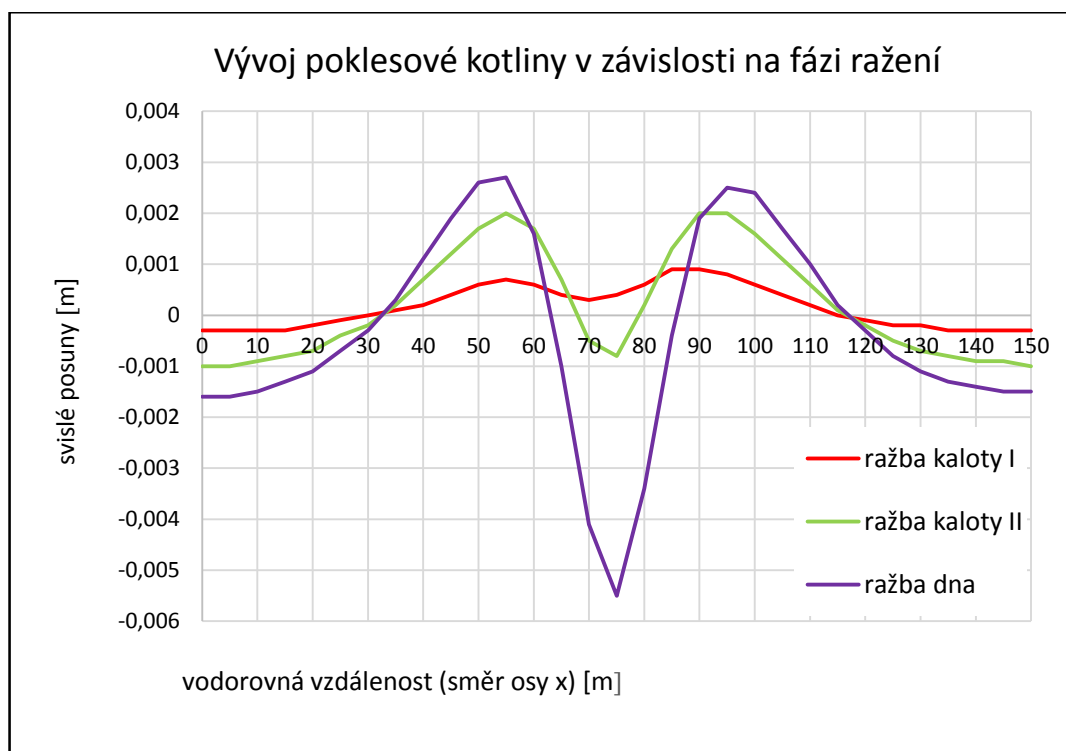


Obr. 57 Vývoj poklesové kotliny ve vybraných řezech

Pro pozorování detailnějšího vývoje poklesové kotliny, byly vybrány tři podélné řezy v modelu (obr 57). Poklesové kotliny v těchto řezech můžeme vidět v grafu 7. Dále můžeme vidět vývoj poklesové kotliny v závislosti na probíhající fázi ražby v grafu 8.



Graf 7 Vývoj poklesové kotliny ve vybraných řezech



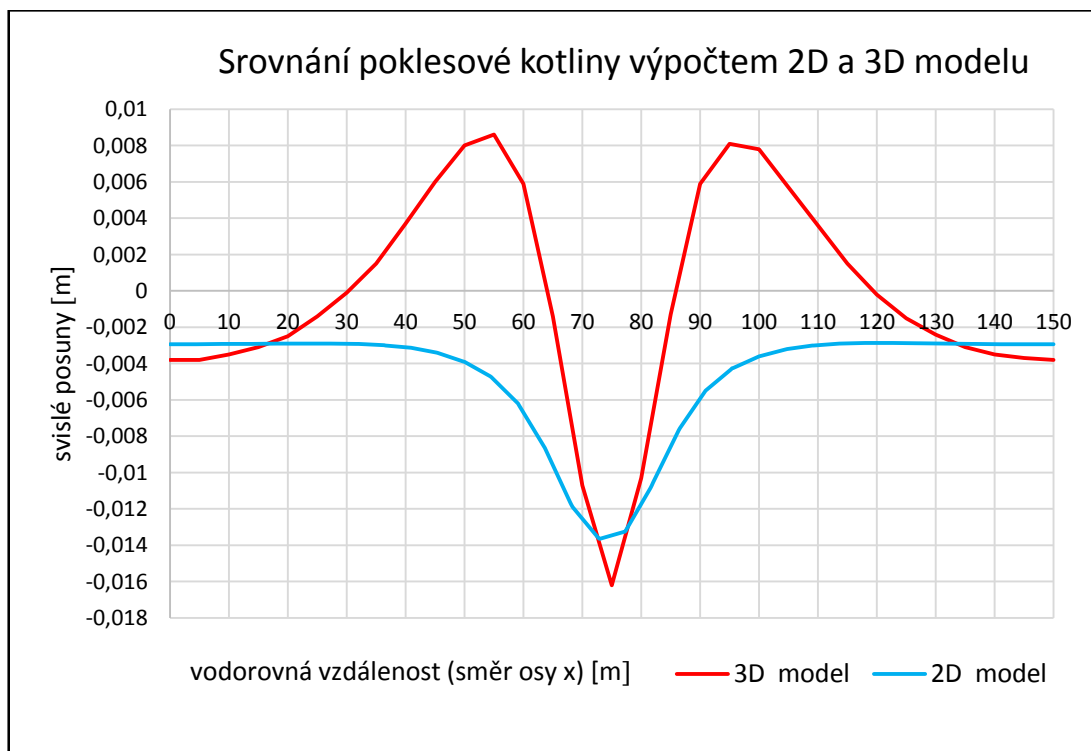
Graf 8 Vývoj poklesové kotliny v závislosti na fázi ražení

Graf vývoje poklesové kotliny na fázi ražení nám umožňuje sledovat vývoj svislých deformací v jednotlivých fázích ražby. V grafu je znázorněna ražba kaloty I, kde dochází ke zvedání nadloží. Dále je zdůrazněna fáze, kdy započala i ražba kaloty II a fáze kdy započala i ražba dna. Největšího sedání ražba přirozeně dosahuje při fázi, kdy dochází k cyklickému střídání všech zabírek včetně dna (v grafu označeno jako ražba dna).

SROVNÁNÍ NUMERICKÝCH MODELŮ 2D A 3D

Numerické modely pro variantu ražby kombinovaným členěním byly provedeny ve dvou rozdílných programech. Dvourozměrný model byl vypracován v programu Plaxis version 8.0 a trojrozměrný model byl zpracován pouze pro jednu vybranou variantu v programu Midas GTS.

Výsledky těchto modelů jsou odlišné především kvůli použití odlišných konstitučních modelů. Z tohoto důvodu musely být i vhodně upraveny parametry zemin. Vývoj poklesových kotlin obou modelů můžeme sledovat v grafu 9, kde jsou patrné větší hodnoty sedání na povrchu území. Z grafu je patrné, že poklesová kotlina se u jílovitých zemin lépe chovala ve výpočtu 2D modelu.



Graf 9 Srovnání poklesové kotliny výpočtem 2D a 3D modelu

7 Závěr

Cílem této diplomové práce je variantní návrh ražby dvoukolejného odstavného tunelu ve městě Baku, hlavním městě Ázerbájdžánu, zejména s ohledem na sedání povrchu území. Předmětem práce je také vytvoření numerických modelů jednotlivých variant, jejich srovnání a stanovení nejvhodnější varianty pro ražbu v daných podmínkách.

První kapitola diplomové práce je zaměřena na teoretickou část. Popisuje Ázerbájdžán, místo realizace podzemního díla, jako rozrůstající se ropnou zemi se svojí historií i kulturou. Kapitola blíže seznamuje se stávajícím systémem metra, který tvoří pouze dvě linky, červená a zelená. Dále bylo uvedeno předpokládané rozšíření linek metra v Baku o linku fialovou, žlutou a modrou.

Druhá kapitola se detailněji věnuje dvoukolejnému odstavnému tunelu, který se nachází za hloubenou stanicí B12 nové fialové linky. Kapitola obsahuje směrové řešení a průjezdný profil daného tunelu, který závisí na velikosti provozovaných souprav metra v Baku. Rozebrány jsou zastižené inženýrskogeologické podmínky a rizika při ražbě v těchto podmínkách. Zmíněny jsou i možné eliminace rizik.

Praktická část diplomové práce se zabývá variantním návrhem ražby odstavného tunelu především s ohledem na sedání a také numerickými modely navržených variant.

Navrženo bylo pět variant ražeb s ohledem na zastižené inženýrskogeologické podmínky a hustou zástavbu na povrchu území. Jednalo se o ražbu horizontálním členěním výrubu s pilotní štolou, vertikální členění výrubu s ponechaným opěrným jádrem horniny, vertikální členění výrubu, kombinované členění výrubu a pro srovnání klasické horizontální členění výrubu. Pro každou variantu ražby byl zpracován detailní postup ražby a vypracovány podélné a příčné řezy technologických postupů při realizaci ražby. Navržena byla i stabilizační předstihová opatření, která v případě potřeby mohou být použita.

Dvourozměrný numerický model byl zpracován pro každou navrženou variantu ražby. Popsána byla tvorba modelu v programu Plaxis 2D version 8.0, pracujícím pomocí metody konečných prvků. Tvorba modelu zahrnovala informace o vkládané geometrii modelu, síti konečných prvků, materiálových charakteristikách a nadefinovaných okrajových podmínkách. V modelu bylo popsáno rozmístění bodů, v nichž budou sledovány vertikální deformace. Body se nacházely v kalotě díla, v počvě díla a na povrchu

území. U každé varianty ražby bylo detailně popsáno zadávání jednotlivých fází výstavby do programu. Výstupy z modelů byly vybrány zejména hodnoty sedání na povrchu, včetně vykreslení průběhu poklesové kotliny a popsání příčin tohoto průběhu. Dále byly vytvořeny grafy pro sledování svislých posunů vybraných bodů, v závislosti na probíhající fázi výstavby. Jako podstatné výsledky byly uvedeny i hodnoty totálních deformací a čerpání pevnosti.

Výsledky dvourozměrných modelů navržených variant byly srovnány pomocí vybraných parametrů a průběhů poklesové kotliny. Nejdůležitějšími parametry pro srovnání se staly šířky poklesových kotlin, maximální sednutí na povrchu území, hodnoty vertikálních a totálních deformací a také čerpání pevnosti. Průběhy poklesových kotlin se vyznačily v jednom grafu, kde je možné sledovat nejpříznivější vývoj kotliny.

Jako nejvhodnější varianta se jevila z hlediska dosažených hodnot sedání ražba vertikálním členěním, která však nebyla vybrána z důvodů nerovnoměrných deformací výrubu, které posléze způsobovali nerovnoměrné deformace i na povrchu území.

Nejvhodnější varianta pro dané podmínky, z hlediska dosažených hodnot srovnávaných parametrů i z hlediska rovnoměrného rozložení deformací, byla vybrána ražba kombinovaným členěním výrubu. Ražba touto metodou měla maximální hodnotu sednutí 13,64 mm a šířku poklesové kotliny 96 m.

Ražba kombinovaným členěním výrubu byla dále zpracována trojrozměrným modelem v programu Midas GTS, který využívá metody konečných prvků. V programu byla zadána geometrie modelu, která byla převzata z 2D modelu a upravena. Prostředí programu neumožňovalo využití konstitučního modelu Hardening soil, který byl použit v dvourozměrných modelech. Z tohoto důvodu musel být použit jiný konstituční model. Jako vhodný model byl vybrán Mohr Coulomb, pro který se musely vhodně upravit zadané parametry. Jednalo se především o změnu modulu pružnosti, deformačního modulu a soudržnosti. Dále se vytvořila síť modelu a zadali se okrajové podmínky. Nadefinováno bylo 100 fází výpočtu na 30 m tunelu.

Z výsledků trojrozměrného modelu byly vybrány vertikální posuny v řezech. Dále byly srovnány průběhy poklesových kotlin ve vybraných podélných řezech a zpracováno srovnání průběhové kotliny v jednotlivých fázích výstavby. Byly také srovnány numerické modely 2D a 3D.

Nutnou záměnou konstitučního modelu Hardening soil za Mohr Coulomb bylo dosaženo poměrně velkého zvedání dna u 3D modelu, ve srovnání s 2D modelem, kde byl použit model Hardening soil. Z uvedeného srovnávacího grafu 2D a 3D modelu je patrné, že vývoj poklesové kotliny u jílovitých zemin, se choval lépe u 2D modelu.

Modely byly zpracovány v programech Plaxis version 8.0 (2D) a Midas GTS (3D). Pro vytvoření těchto modelů můžou být použity i programy Plaxis 3D nebo Geo 5 pro model výrubu. Tyto programy nemohli být použity z důvodu chybějících výukových licencí.

Modelování v trojrozměrném prostředí je velmi náročná práce z hlediska požadavků na čas i hardwarové vybavení. Velmi důležitá je funkčnost modelu a správně použité konstituční modely. Pro správný průběh výpočtu musíme mít k dispozici všechny potřebné parametry zemin pro zvolený konstituční model, což bývá většinou velmi těžké. A proto je nutné mít na paměti, že se jedná pouze o model, který se musí i vhodně interpretovat.

Seznam internetových zdrojů

- [1] **Azerbajdžán, Baku.**[online]. [cit. 2015-6-20].
Dostupné z: <http://azerbajdzan.czechian.net/2012/09/Baku.html>
- [2] **Baku- město, kde vítr fouká a ohně hoří.**[online]. [cit. 2015-6-25].
Dostupné z: <http://azerbajdzan.svetadily.cz/clanky/Baku-město-kde-vitr-fouka-a-ohne-hori>
- [3] **Extension of the Baku MRT.**[online]. [cit. 2015-7-2].
Dostupné z: http://www.systra.com/IMG/pdf/metro_baku_en.pdf
- [4] **Redukce deformací nadloží a ochrana povrchové zástavby při těžbě tunelů.**[online]. [cit. 2015-7-13].
Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/tisk.php?ID=227>
- [5] **Numerický model NRTM tunelu v tuhém jílu.** [online]. [cit. 2015-7-13].
Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/uhigug/masin/download/SM_Geotechnika12.pdf
- [6] **Zakládání staveb –Mikropiloty.** [online]. [cit. 2015-7-15].
Dostupné z: <http://www.topgeo.cz/cs/zakladani-staveb-a-specialni-zakladani-staveb/mikropiloty>
- [7] **Trysková injektáž.** [online]. [cit. 2015-7-20].
Dostupné z: <http://www.zakladani.cz/cz/tryskova-injektaz>
- [8] **Mládek navštívil Azerbajdžán, podpoří exportéry.** [online]. [cit. 2015-7-21].
Dostupné z: <http://iuhli.cz/mladek-navstivi-azerbajdzan-podpori-exportery/>
- [9] **Mapa metro de Baku** [online]. [cit. 2015-6-16].
Dostupné z: <http://www.mapametro.com/en/tag/guia-metro-baku/>

- [10] **Ražba tunelů na dopravní stavbě (Votice – Benešov u Prahy)** [online]. [cit. 2015-7-3].
Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/razba-tunelu-na-dopravni-stavbe-modernizace-trati-votice-benesov-u-prahy/>
- [11] **Plaxis 2D – Tutorial manual.** [online]. [cit. 2015-6-16].
Dostupné z: <http://www.plaxis.nl/files/files/2D-1-Tutorial.pdf>

Seznam knižních zdrojů

- [12] KREPELKA, František a Gejza ZÁHORANSKÝ a kol. ***Tunely***. TU v Košicích. ISBN 80-8073-591-3
- [13] KLEPSATEL, František, KUSÝ, MAŘÍK, ***Výstavba tunelů ve skalních horninách***. Bratislava, ISBN-80-88905-43-5
- [14] ALDORF, Josef, ***Mechanika podzemních konstrukcí***, Ostrava, ISBN-80-7078-695-7
- [15] EXNER K., ***Ražení důlních děl***, Ostrava, ISBN-80-707-8077-0

Seznam obrázků:

Obr. 1 Mapa Ázerbájdžánu a sousedních zemí	13
Obr. 2 Těžba na předměstí Baku [8].....	14
Obr. 3 Současný systém metra [9].....	15
Obr. 4 Plán rozšíření linek metra v Baku [8].....	16
Obr. 5 Směrové řešení odstavného tunelu	17
Obr. 6 Profil odstavného tunelu.....	18
Obr. 7 Standartní jádrový vrt P_DBH_122 (vrt v oblasti stanice B12).....	19
Obr. 8 Mikropilotový deštník portálu tunelu (trať Votice – Benešov u Prahy) [10].....	26
Obr. 9 Jednotlivé fáze ražby - horizontální členění s pilotní štolou	27
Obr. 10 Příčný řez tunelem - horizontální členění s pilotní štolou.....	28
Obr. 11 Jednotlivé fáze ražby – vertikální členění v. s ponechaným jádrem horniny.....	29
Obr. 12 Příčný řez tunelem – vertikální členění v. s ponechaným jádrem horniny	30
Obr. 13 Jednotlivé fáze ražby – vertikální členění výrubu.....	31
Obr. 14 Příčný řez tunelem – vertikální členění výrubu.....	32
Obr. 15 Jednotlivé fáze ražby – kombinované členění výrubu	33
Obr. 16 Příčný řez tunelem - kombinované členění	34
Obr. 17 Jednotlivé fáze ražby - horizontální členění.....	35
Obr. 18 Příčný řez tunelem - horizontální členění.....	35
Obr. 19 Základní geometrie a rozměry modelu odstavného tunelu	37
Obr. 20 Schéma sledovaných bodů svislých posunů.....	40
Obr. 21 Síť numerického modelu – ražba pilotní štolou	41
Obr. 22 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem - ražba pilotní štolou	43
Obr. 23 Vertikální deformace u_y - ražba pilotní štolou	44
Obr. 24 Totální deformace u - ražba pilotní štolou	46
Obr. 25 Čerpání pevnosti – ražba pilotní štolou.....	46
Obr. 26 Síť numerického modelu – ražba vertikálním čl. s opěrným jádrem	47
Obr. 27 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem – vertikální čl. s opěr. jádrem	50
Obr. 28 Vertikální deformace u_y - ražba vertikálním čl. s opěrným jádrem	51
Obr. 29 Totální deformace u - ražba vertikálním čl. s opěrným jádrem	53
Obr. 30 Čerpání pevnosti – ražba vertikálním čl. s opěrným jádrem.....	53
Obr. 31 Síť numerického modelu – ražba vertikálním členěním	54
Obr. 32 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem - ražba vertikálním členěním	56

Obr. 33 Vertikální deformace u_y - ražba vertikálním členěním	57
Obr. 34 Totální deformace u - ražba vertikálním členěním	59
Obr. 35 Čerpání pevnosti – ražba vertikálním členěním	59
Obr. 36 Síť numerického modelu – ražba kombinovaným členěním.....	60
Obr. 37 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem - ražba kombinovaným členěním..	62
Obr. 38 Vertikální deformace u_y - ražba kombinovaným členěním.....	63
Obr. 39 Totální deformace u - ražba kombinovaným členěním.....	65
Obr. 40 Čerpání pevnosti – ražba kombinovaným členěním	65
Obr. 41 Síť numerického modelu – ražba horizontálním členěním	66
Obr. 42 Průběh vertikálních posunů nad raženým dílem - ražba horizontálním členěním	68
Obr. 43 Vertikální deformace u_y - ražba horizontálním členěním	69
Obr. 44 Totální deformace u - ražba horizontálním členěním	70
Obr. 45 Čerpání pevnosti – ražba horizontálním členěním	71
Obr. 46 Geometrie numerického modelu 3D	74
Obr. 47 Síť numerického modelu 3D	76
Obr. 48 Detail sítě numerického modelu 3D	76
Obr. 49 Okrajové podmínky numerického modelu 3D	77
Obr. 50 Ukázka zadávání fází výpočtu, primární stav	78
Obr. 51 Vertikální posuny (axonometrický pohled).....	78
Obr. 52 Detail vertikálních posunů.....	79
Obr. 53 Vertikální posuny v řezu procházející osou tunelu	79
Obr. 54 Vývoj poklesové kotliny v příčném řezu (axonometrický pohled).....	80
Obr. 55 Vývoj poklesové kotliny v podélném řezu (boční pohled)	80
Obr. 56 Vývoj poklesové kotliny ve dvou na sebe kolmých řezech	81
Obr. 57 Vývoj poklesové kotliny ve vybraných řezech	81

Seznam grafů:

Graf 1 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba pilotní štolou.....	45
Graf 2 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba vertikálním čl. s opěr. jádrem.....	52
Graf 3 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba vertikálním členěním.....	58
Graf 4 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba kombinovaným členěním	64
Graf 5 Vertikální deformace sledovaných bodů - ražba horizontálním členěním.....	69
Graf 6 Srovnání průběhu poklesových kotlin jednotlivých variant ražeb	72
Graf 7 Vývoj poklesové kotliny ve vybraných řezech	82
Graf 8 Vývoj poklesové kotliny v závislosti na fázi ražení.....	82
Graf 9 Srovnání poklesové kotliny výpočtem 2D a 3D modelu.....	83

Seznam tabulek:

Tab. 1 Materiálové charakteristiky zemin (konstituční model Mohr Coulomb).....	38
Tab. 2 Materiálové charakteristiky zemin (konstituční model Hardening soil).....	38
Tab. 3 Materiálové charakteristiky primárního ostění.....	39
Tab. 4 Srovnání vybraných parametrů jednotlivých variant ražeb.....	73
Tab. 5 Upravené materiálové charakteristiky zemin (konstituční model Mohr Coulomb) 75	

Seznam příloh:

Příloha 1	Směrové řešení odstavného tunelu
Příloha 2	Geometrie oblouků primárního a sekundárního ostění
Příloha 3	Podélný geologický řez
Příloha 4	Návrh postupu ražby pomocí pilotní štoly
Příloha 5	Návrh postupu ražby vertikálním členěním s ponechaným jádrem horniny
Příloha 6	Návrh postupu ražby vertikálním členěním
Příloha 7	Návrh postupu ražby kombinovaným členěním
Příloha 8	Návrh postupu ražby horizontálním členěním
Příloha 9	Vývoj vertikálních deformací u ražby kombinovaným členěním